



# Evaluation de l'apport simultané des coutures sur la perméabilité des préformes cousues et sur les performances mécaniques des structures composites cousues

Yang Song

## ► To cite this version:

Yang Song. Evaluation de l'apport simultané des coutures sur la perméabilité des préformes cousues et sur les performances mécaniques des structures composites cousues. Mécanique [physics.med-ph]. Université de Technologie de Compiègne, 2015. Français. NNT : 2015COMP2250 . tel-01306931

**HAL Id: tel-01306931**

**<https://theses.hal.science/tel-01306931>**

Submitted on 25 Apr 2016

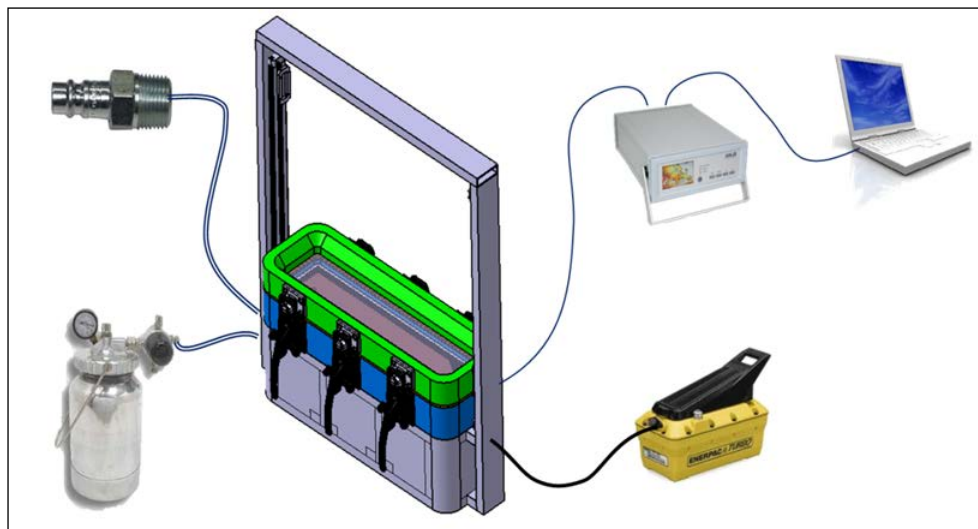
**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Par Yang SONG

*Évaluation de l'apport simultané des coutures sur la perméabilité des préformes cousues et sur les performances mécaniques des structures composites cousues*

Thèse présentée  
pour l'obtention du grade  
de Docteur de l'UTC



Soutenue le 22 décembre 2015  
**Spécialité** : Mécanique Avancée

D2250

Université de Technologie de Compiègne  
Laboratoire Roberval UTC RUMR CNRS 7337

**Evaluation de l'apport simultané des coutures sur la perméabilité  
des pr éformes cousues et sur les performances m écaniques des  
structures composites cousues**

Thèse de Doctorat

Présentée en vue de l'obtention du grade de  
Docteur de l'Université de Technologie de Compiègne  
Spécialité : Mécanique Avancée

Défendue publiquement le 22 Décembre 2015 par

Yang SONG

Jury de Soutenance

Abdellatif OUAHSINE	Université de Technologie de Compiègne	Co Directeur de thèse
Damien SOULAT	ENSAIT ROUBAIX	Rapporteur
Kamel KHELLIL	Université de Technologie de Compiègne	Directeur de thèse
Philippe MARGUERES	Université Paul Sabatier, IUT de TOULOUSE	Examineur
Xiaojing GONG	Université Paul Sabatier, IUT de TARBES	Rapporteur
Zoheir ABOURA	Université de Technologie de Compiègne	Examineur

## Remerciements

Les travaux présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein du Laboratoire Roberval de l'Université de Technologie de Compiègne (UTC), sous la direction de Kamel KHELLIL, en codirection avec le professeur Abdellatif OUAHSINE.

Tout d'abord, mes premiers remerciements s'adressant à Monsieur Kamel Khellil. Ses compétences scientifiques et ses conseils ont bien dirigés ce travail et m'ont permis de maîtriser les connaissances et réaliser au mieux ces travaux de recherche pendant ces trois années.

Je remercie le professeur Zoheir ABOURA avec M<sup>elle</sup> Justine BIGAUD pour leur assistance et leur aide notamment au cours des travaux de couture. Leur compétences m'ont permis de fournir les préformes pour réaliser mes échantillons.

Je remercie Monsieur Abdellatif OUAHSINE et Monsieur Hassan SMAOUI, qui a encadré mes travaux de recherche notamment pour la partie de flux à travers les préformes.

Je remercie également le professeur Aïssa OULD DRISS, pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux et pour les discussions très fructueuses sur les aspects de perméabilité.

Je remercie également Messieurs Gérard MARICHAL et Nicolas BRICE ainsi que M<sup>elle</sup> Isabelle VELLUET, techniciens de notre laboratoire ; merci pour les conseils et aide dans la partie des essais mécaniques.

Je tiens à remercier mon ami Chao DONG et mes amis Shaojuan HUANG, Zhicheng HOU et Chen ZHENG pour leur aide à résoudre mes problèmes expérimentaux.

Je n'oublierai jamais d'adresser mes remerciements à tous mes collègues du laboratoire pour leur aide d'améliorer mon français.

Enfin, merci à ma famille pour son soutien pendant ces trois ans.

## Résumé

Les matériaux composites 3D obtenus par couture ou piquage transverses présentent de nombreux atouts comparativement aux tissages interlocks ou orthogonaux 3D. Dans le but d'évaluer le potentiel de cette nouvelle génération de matériaux 3D, certaines études ont été consacrées à leur caractérisation mécanique. D'autres études se sont focalisées sur l'influence de certains types de coutures sur la perméabilité de matériaux cousus de type NCF (Non Crimp Fabrics).

Cette thèse se propose d'étudier l'apport des coutures de type **Tufting** dans le renforcement transverse de tissus classiques 2D. Cet apport est évalué, conjointement, du point de vue mécanique et du point de vue de la perméabilité. Parmi les nombreux paramètres de couture, l'étude s'est focalisée sur l'influence de la densité de couture. A ce titre, trois différentes densités de coutures ont été réalisées, grâce à un robot de couture disponible au sein de notre laboratoire.

Du point de vue de la perméabilité, les préformes cousues ont été réalisées avec des empilements identiques à ceux des préformes non cousues. L'évaluation des perméabilités a été conduite à travers un banc de mesure de perméabilité à flux unidirectionnel. Avec cette méthode, le tenseur de perméabilité plane est obtenu à travers trois mesures unidirectionnelles :  $0^\circ$  (chaîne),  $90^\circ$  (trame) et  $45^\circ$ . L'analyse des résultats montre que la couture de type Tufting induit un effet atténuateur du rapport d'anisotropie  $K_1/K_2$ . D'autre part, il ressort que la position du fil de couture provoque des gradients de perméabilités locaux, très prononcés entre la surface et le cœur de la préforme.

Pour les besoins de la caractérisation mécanique, six plaques composites ont été réalisées par le procédé RTM. Pour atteindre les caractéristiques mécaniques hors-plan, des plaques de 20 mm d'épaisseur, cousues et non cousues ont été réalisées. La **CIN** (Corrélation d'Image Numérique) a été utilisée pour cartographier les distributions des champs de déplacement lors des essais mécaniques (traction, compression sur cube et flexion en poutre courte), ceci afin de tenir compte de la présence des coutures au sein des matériaux. Les performances mécaniques évaluées se sont révélées bien en deçà des attentes, surtout en ce qui concerne les caractéristiques hors-plan. L'analyse micrographique des matériaux a révélé la présence de porosités concentrées au sein, ou dans le voisinage proche, des coutures. D'autre part, les coutures présentaient des courbures ou vrillages, provoquées par le compactage lors de la fermeture du moule RTM.

En faisant le lien avec les résultats de perméabilité, il ressort que la présence des porosités au sein des coutures est une conséquence des gradients de perméabilité qui induisent des reffermetures de flux d'imprégnation.

Mot clés : RTM, Tufting, Perméabilité, Porosité, CIN

## Table des Matières

<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>2</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>3</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>7</b>
<b>CHAPITRE I ÉTAT DE L'ART ET BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>11</b>
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>11</b>
<b>I.2 Architectures de renforcement.....</b>	<b>11</b>
I.2.1 Les renforts 2D .....	12
I.2.2 Les renforts 3D .....	15
I.2.3 Les armatures 2D renforcées dans l'épaisseur .....	18
<b>I.3 Perm éabilit édes tissus.....</b>	<b>24</b>
I.3.1 Notion de perméabilité des milieux poreux.....	24
I.3.2 Perm éabilité des tissus non cousus .....	26
I.3.3 Perm éabilité des tissus cousus .....	29
<b>I.4 Comportement m écanique des pr éformes cousues .....</b>	<b>30</b>
<b>CHAPITRE II MATÉRIAUX ET MISE EN ŒUVRE .....</b>	<b>34</b>
<b>II.1 Proc édl éde couture.....</b>	<b>34</b>
II.1.1 Paramètres de couture et mode opératoire .....	34
II.1.2 Anisotropie additionnelle introduite par la couture .....	36
II.1.3 Taux volumique en fibre spécifique aux coutures .....	37
<b>II.2 Mise en œuvre des plaques composites .....</b>	<b>37</b>
II.2.1 Équipements et outillages.....	38
II.2.2 Protocole d'injection de la résine .....	39

<b>II.3</b>	<b>Evaluation de la qualité des plaques moulées.....</b>	<b>41</b>
II.3.1	Taux Volumiques en fibres .....	42
II.3.2	Mesure des taux de porosités.....	44
II.3.3	Analyse micrographique.....	45
<b>II.4</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>50</b>
 <b>CHAPITRE III DÉTERMINATION EXPÉRIMENTALE DE LA</b>		
<b>PERMÉABILITÉ .....</b>		<b>52</b>
<b>III.1</b>	<b>Généralités sur la mesure de perméabilité.....</b>	<b>52</b>
<b>III.2</b>	<b>Méthode à flux unidirectionnel .....</b>	<b>54</b>
<b>III.3</b>	<b>Dispositif expérimental.....</b>	<b>56</b>
<b>III.4</b>	<b>Protocole expérimental.....</b>	<b>57</b>
III.4.1	Préparation des échantillons.....	57
III.4.2	Détermination du Taux Volumique en fibre .....	58
III.4.3	Fluide d'imprégnation .....	59
III.4.4	Acquisition et exploitation des données .....	60
<b>III.5</b>	<b>Résultats.....</b>	<b>60</b>
III.5.1	Préformes non cousues.....	61
III.5.2	Préformes cousues.....	62
III.5.3	Comparaison sur les perméabilités mesurées .....	63
III.5.4	Conséquences sur le tenseur de perméabilité .....	66
III.5.5	Prise en compte du TVf des coutures .....	67
<b>III.6</b>	<b>Effets des coutures de type OSS sur un renfort cousu.....</b>	<b>69</b>
<b>III.7</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>73</b>
 <b>CHAPITRE IV EFFET DE L'INTRODUCTION DES COUTURES SUR</b>		
<b>LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE.....</b>		<b>75</b>
<b>IV.1</b>	<b>Instrumentations.....</b>	<b>75</b>

<b>IV.2</b>	<b>Caractéristiques dans le plan.....</b>	<b>77</b>
IV.2.1	Matériaux non cousus .....	77
IV.2.2	Matériaux cousus .....	79
IV.2.3	Analyse des résultats.....	81
<b>IV.3</b>	<b>Caractéristiques hors-plan.....</b>	<b>83</b>
IV.3.1	Compression sur cube .....	83
IV.3.2	Comportement au cisaillement hors-plan .....	88
<b>IV.4</b>	<b>Synthèse .....</b>	<b>100</b>
<b>CHAPITRE V CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....</b>		<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>104</b>



## Introduction

Cette dernière décennie est clairement marquée par un fort regain d'intérêt pour les matériaux composites. Ce dernier est essentiellement porté par l'industrie aéronautique, mais dans une moindre mesure, d'autres secteurs de l'industrie tels que l'automobile, le ferroviaire ou l'éolien, y trouvent un intérêt. Dans le monde aéronautique, l'intérêt évident reste toujours l'allègement, de plus en plus poussé, des structures volantes. Conjointement à l'allègement et pour répondre aux nouvelles normes environnementales, les principaux objectifs visés sont la réduction des émissions de gaz à effets de serre et des nuisances sonores, mais aussi la réduction des coûts de production et de maintenance. Dans cette mouvance, une multitude de programmes de recherche a été engagée dans quasiment tous les domaines liés aux matériaux composites. À titre d'exemple, on peut citer la recherche et le développement de nouveaux matériaux tels que les composites à matrices thermoplastiques et les composites à matrice céramique ou l'aspect procédé de mise en forme tel que la dépose automatique (placement de fibre) et la maîtrise des procédés par injection de résine type LCM (Liquide Composite Molding). L'objectif à atteindre étant une incorporation massive des composites dans les aéronefs. À ce titre et comme le montre la figure (Figure 1), les dernières générations d'avions des deux principaux constructeurs, Airbus et Boeing, incorporent plus de 50% en masse de matériaux composites.

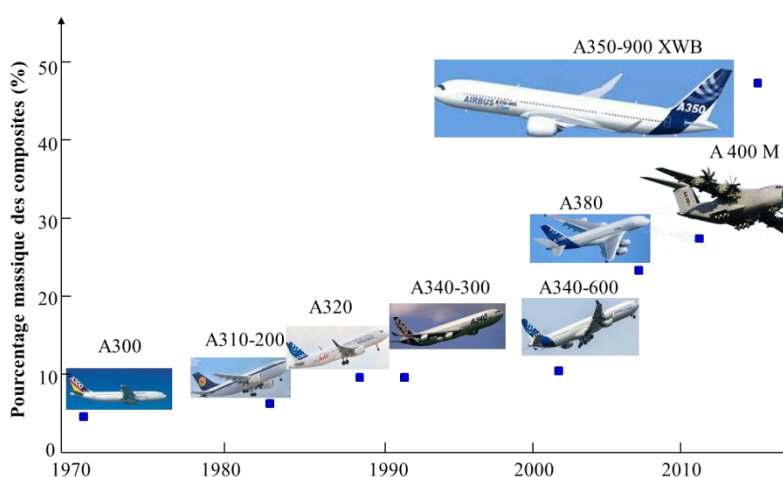


Figure 1: 40 ans d'évolution des aérostructures chez Airbus.

Cette incorporation, de plus en plus importante, est liée au fait que dans les anciennes générations d'avions, les composites n'étaient réservés qu'aux structures secondaires. À l'heure actuelle, les

composites aéronautiques s'appliquent aussi bien aux structures secondaires (structures fines de type plaques ou coques) qu'aux structures primaires très souvent épaisses.

Du point de vue mécanique, les stratifiés 2D classiques, de par leur inhérente faiblesse des caractéristiques hors-plan, ont rapidement montré leurs limites pour des applications en structures épaisses. Ces dernières ont été rendues possibles grâce au développement des architectures de renfort 3D.

De façon générale, les renforts 3D se subdivisent en deux familles. D'une part, les architectures de renforcement tridimensionnelles telles que les tissages Interlocks et les tissages 3D orthogonaux et d'autre part les technologies visant à renforcer, dans l'épaisseur, les empilements de tissus classiques 2D. Ce renforcement dans l'épaisseur est obtenu par différentes technologies telles que le Z-pinning ou par couture.

De par sa facilité de mise en œuvre, le renforcement par couture transversale se positionne comme une des technologies les plus économiques pour réaliser des architectures de renforcement 3D. Elle possède aussi l'avantage de faciliter grandement l'opération de drapage par assemblage des différents plis et des différents coupons de la préforme sèche. Dans le cas des structures raidies, elle peut être une bonne alternative à l'assemblage "peau/raidisseur" de telles structures comparativement au collage, au Co-curing ou au rivetage.

Par ses multiples possibilités et avantages, cette nouvelle technologie suscite un fort intérêt dans la communauté scientifique. Comme nous le verrons dans le chapitre bibliographique, de nombreuses études ont été consacrées à l'évaluation de l'influence de ces coutures sur les performances mécaniques des composites stratifiés 2D renforcés par coutures transverses.

Pour de telles structures, du fait que le renforcement s'opère sur des préformes sèches, celles-ci sont exclusivement destinées à être mises en œuvre par les procédés de type LCM. Dans cette classe de procédés, le RTM (Resine Transfert Molding) occupe une place prépondérante, car il permet d'atteindre des qualités quasi identiques au moulage par autoclave des préimprégnés et ce à moindre coût (pour les structures hautes performances).

De ce fait, de nombreuses études sont consacrées à ce procédé. L'objectif étant une maîtrise totale de tous les paramètres intervenants dans le processus de réalisation des structures

composites par RTM. Parmi ces paramètres, la perméabilité des préformes sèches est jugée comme le facteur clef qui gouverne le procédé.

La détermination des perméabilités des préformes sèches est un domaine de la recherche relativement récent qui n'a pas encore atteint sa pleine maturité (cf. chapitre I). Une normalisation de la mesure expérimentale des perméabilités est actuellement en concertation à l'échelle de la communauté scientifique mondiale.

Dans ce contexte, concernant les stratifiés 2D cousus, certains auteurs ont abordé l'étude de l'influence des coutures sur la perméabilité des préformes sèches cousues. La présence de ces coutures aura forcément une influence sur la perméabilité et au final sur le déroulement du procédé RTM en lui-même.

À travers ce bref état de l'art, on constate que des études ont été menées, séparément, d'une part, sur l'influence des coutures sur les performances mécaniques des stratifiés 2D cousus et d'autre part sur l'influence des coutures sur la perméabilité des préformes sèches cousues. La grande diversité des matériaux étudiés, associée aux multiples procédés de couture et aux divers paramètres liés à chaque type de couture font qu'il est très difficile d'évaluer l'apport conjoint des coutures sur les performances mécaniques et sur la perméabilité des structures composites cousues.

Dans la conception des structures composites cousues, la connaissance de cet apport conjoint devient une nécessité. À plus long terme, la compréhension des mécanismes induits par la présence des coutures permettra d'alimenter et enrichir les codes de simulation numérique développés pour le dimensionnement et pour la simulation des procédés de mise en œuvre de ces nouveaux matériaux.

Les travaux présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans ce contexte. Ils se proposent, pour un même matériau, mis en œuvre dans les mêmes conditions, d'évaluer l'influence simultanée des coutures sur les performances mécaniques de la structure et sur la perméabilité des préformes sèches qui lui ont donné naissance.



## Chapitre I État de l'art et bibliographie

### I.1 Introduction

À l'heure actuelle, il est communément reconnu que les performances mécaniques d'une structure composite ne dépendent pas uniquement du renfort qui la constitue. Les paramètres utilisés dans le procédé de mise en œuvre ont une incidence non négligeable sur les propriétés mécaniques finales de la structure. Les aspects "mécanique et process de fabrication" sont donc complémentaires et indissociables. Avec la simulation numérique, l'optimisation des structures composites passe par une parfaite connaissance des architectures de renfort et des procédés de mise en œuvre qui leur sont dédiés (Figure 2).

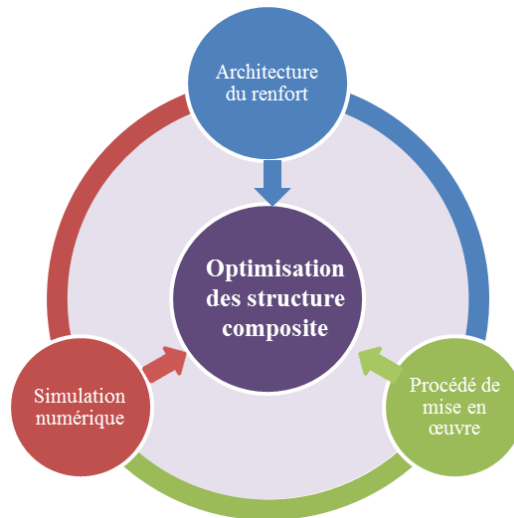


Figure 2: Démarche d'optimisation des structures composites.

Dans cette logique, ce chapitre présente un état de l'art sur les développements liés aux architectures de renfort, en mettant l'accent sur les renforts cousus. Conformément à l'objectif de la thèse, l'aspect "process" ne sera abordé que du point de vue de la perméabilité des préformes.

### I.2 Architectures de renforcement

Les architectures de renforcement 3D ont été développées pour les structures composites épaisses afin de combler les lacunes inhérentes aux stratifiés classiques 2D, telles que leur aptitude au délaminage et leur faible tolérance au choc et à l'endommagement.

Les techniques de fabrication des architectures 3D sont multiples. Chacune a ses avantages et ses inconvénients. Cependant, de par leur complexité structurelle, toutes ces nouvelles architectures ont bouleversé les concepts et les connaissances acquises ; tant du point de vue du comportement mécanique que de la modélisation numérique ou des procédés de mise en œuvre. Un effort continu de recherche et développement est mené afin de mieux appréhender leur comportement mécanique et les procédés de mise en œuvre qui leur sont associés.

Les architectures 3D sont classées en deux grandes familles : les armatures obtenues directement par les procédés de tissage, tressage ou tricotage et celles qui utilisent les armures classiques "2D" avec ajout, après empilement, d'un fil, dans l'épaisseur, pour constituer l'armature finale 3D. Les matériaux sujets de notre étude appartiennent à cette dernière classe.

### I.2.1 Les renforts 2D

Ce type d'architectures regroupe les tissus classiques, les renforts tressés et les tricotés.

#### Les tricotés

Le tricotage est une technique de mise en forme de structures textiles à partir d'une ou plusieurs mèches. Les tricots sont obtenus par entrelacement d'un fil sur lui-même pour former une chaîne de mailles reliées entre elles. Selon la direction dans laquelle les boucles sont formées, on peut obtenir des tricots en sens trame ou en sens chaîne [1]. Les textiles tricotés sont très bien adaptés pour la réalisation de pièces de formes complexes tridimensionnelles. Cependant, leurs propriétés mécaniques dans le plan sont restreintes. Ceci est dû au fort embuvage (ondulation des torons) généré par le procédé de tricotage (Figure 3).

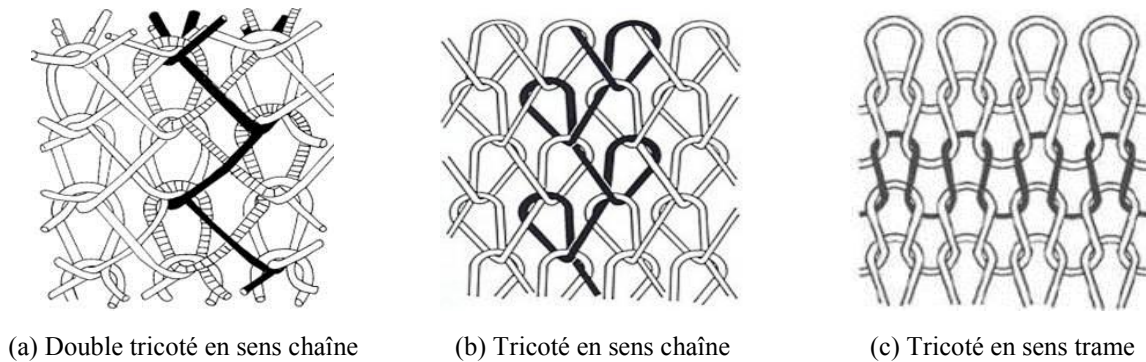


Figure 3 : Exemples de textiles tricotés [1]

## Les tressés

Ils sont fabriqués à partir d'au moins deux types de mèches qui parcourent chacune une trajectoire pas forcément droite, tout en créant une direction privilégiée en renfort. L'armature est réalisée par entrelacement des différentes mèches entre elles (Figure 4). Il s'effectue par un simple moyen technique de changement de position des porteurs de bobine de chaque type de mèche[2].

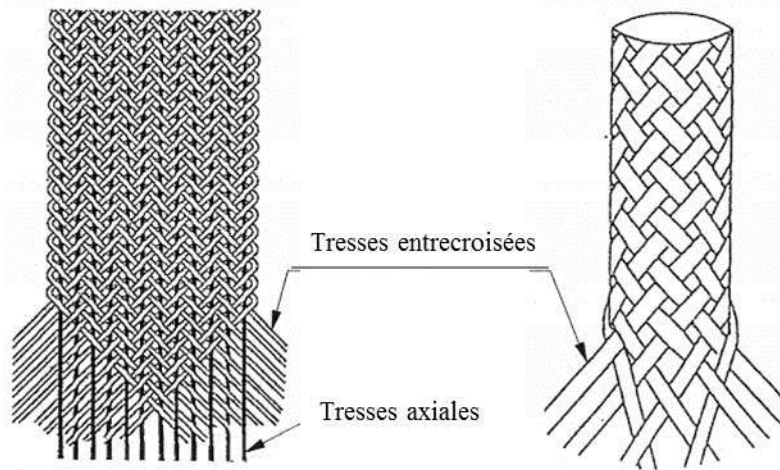


Figure 4 : Exemples de renforts tressés 2D.

Traditionnellement réservés à des préformes cylindriques, avec le développement de la robotique, le tressage accède désormais à des préformes axisymétriques par forcement cylindriques (Figure 5).

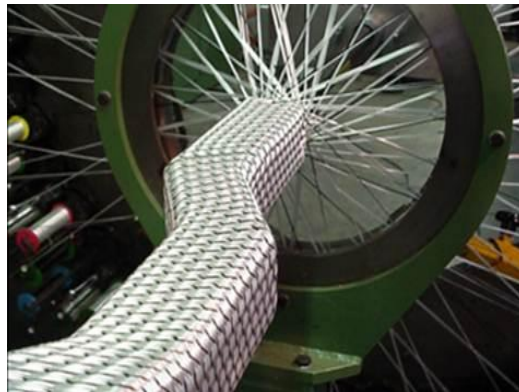


Figure 5 : Exemple de préforme tressée non cylindrique.

## Les tissés

Les tissus sont, de loin, les plus communément utilisés pour la réalisation de pièces de structures. On distingue trois grandes familles [1], (Figure 6).

- Le taffetas (ou toile) : Il se caractérise par un entrecroisement alterné des mèches de sens chaîne et de sens trame. Le fil de trame passe alternativement au-dessus puis sous chaque mèche de chaîne. Le produit obtenu est plat, relativement rigide et peu déformable (Figure 6.(a)).
- Le sergé " $n \times m$ " : Le fil de trame passe au-dessus de " $m$ " fils de chaîne, chacun passant à son tour sur " $n$ " fils de trame. Les points de liage successifs forment une diagonale. Cette armure est à la fois souple et dense (Figure 6.(b)).
- Le satin " $n$ " : Les tissages satin peuvent être considérés comme des tissus sergés modifiés pour produire moins d'intersections de chaîne et de trame. Chaque fils de trame flotte au-dessus de " $n-1$ " fils de chaîne. Les points de liage ne sont pas consécutifs. Les tissages satins sont très plats, ont une bonne mouillabilité et un degré élevé de drapabilité (Figure 6.(c)).

Le matériau support de notre étude appartient à cette famille, il s'agit d'un satin de 5 (cf.chapitre II).

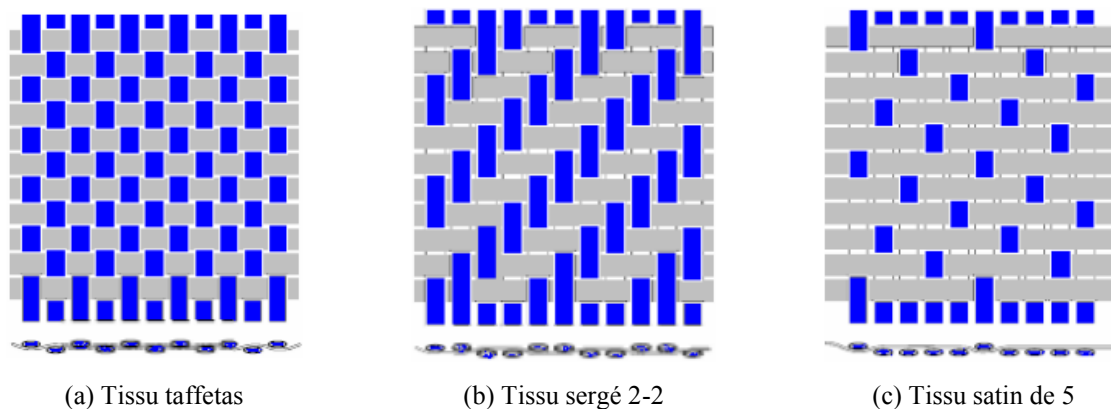


Figure 6 : Schéma des principales familles de tissus de renfort 2D [3].

Les renforts de type tissés permettent des drapages complexes, non développables, car ils peuvent être fortement cisailés et fléchis (à sec). Les stratifiés en usage actuellement sont obtenus à partir de ce type de renfort. La rigidité de la structure finale est obtenue par empilements successifs des plis en jouant sur l'orientation de ceux-ci.



L'appellation "stratifiés" vient du fait que la structure obtenue est lamellaire, dans le sens où les différents plis ne possèdent pas de liens autres que la matrice (le liant). Dès lors, ces matériaux deviennent très sensibles au délaminage qui, quand il apparaît, se propage sans obstacle et peut conduire à la ruine de la structure.

### **I.2.2 Les renforts 3D**

Cette famille de renforts regroupe les tressés 3D, les tricotés, les tissés 3D et les cousus.

#### **Les tressés 3D**

Une extension de la technologie de tressage (2D) est la tresse 3D (Figure 7), dans laquelle les mèches sont entrelacées de façon à ne pas distinguer les couches.

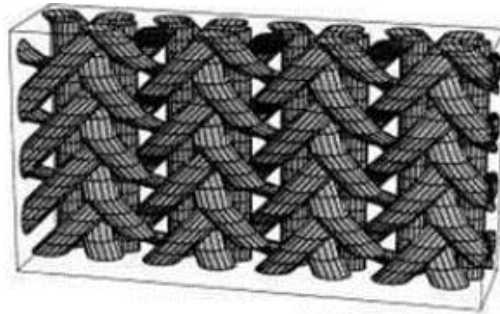


Figure 7 : Exemples de renforts tressés en 3D.

#### **Les tricotés 3D**

Les préformes tricotées 3D (Figure 8), comme les 2D, ont une facilité à reproduire des formes géométriques architecturales complexes.

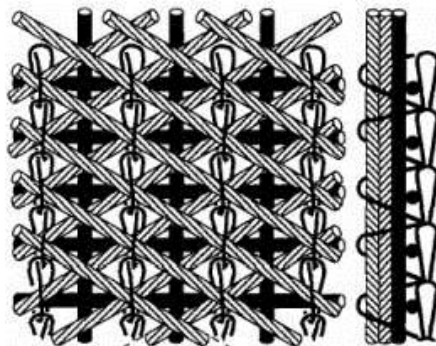


Figure 8 : Exemple de renforts tricotés en 3D [4].

### **Les tissés 3D**

Les tissés 3D renforcent l'épaisseur tout en gardant la maniabilité de manœuvrer facilement des mèches ondulatoires comme pour les tissus 2D. Ce tissage est apparu en portant un nom de famille lié à sa structure de tissage : "Angle Interlock". Dans ces matériaux, les différentes "couches" sont assemblées structurellement entre elles lors du tissage de la préforme.

Les tissages "Angle Interlock" sont constitués d'une structure de plusieurs plans nominaux contenant des mèches droites dirigées en sens chaîne et sens trame. Ces plans sont reliés entre eux à travers des mèches de chaîne. Différents types de tissage "Angle Interlock" sont présentés en Figure 9.

Le tissage "Angle Interlock 3D" se fait avec trois types de renfort. Le renfort dans la direction chaîne, le renfort dans la direction trame et le renfort qui traverse l'épaisseur de plan en plan. Ces derniers ondulent à travers toutes les couches d'empilement des mèches sens trame [5]. Le tissage est connu sous le nom "Through-Thickness Angle Interlock" (Figure 9 (a)).

Le tissage Angle Interlock "couche-couche" est présenté par la Figure 9 (b) [6]. Dans chaque descente ou montée, les mèches sens chaîne ondulent à travers un nombre de couches d'empilement de mèches sens trame, inférieur au nombre total de couches et supérieur à 2. Il est connu sous le nom de "Layer-Layer Angle Interlock". Pour ce cas de tissage, la mèche sens chaîne suit une trajectoire en majorité proche de la linéarité d'où la désignation de la structure de la préforme sous "Structure entrelacée droite".

Le tissage angle interlock "couche à couche" est présenté dans la Figure 9 (c) [7]. Les mèches sens chaîne ondulent entre deux couches successives d'empilement de mèches sens trame. Il est connu sous le nom de "Layer to Layer Angle Interlock". Entre deux couches d'empilement, la mèche sens chaîne conserve une forme ondulatoire, la structure de la préforme est dite "Structure entrelacée ondulatoire".

Le tissage Interlock orthogonal est constitué d'au moins trois types de mèches dont obligatoirement, deux orientées dans le sens chaîne et trame (plan xy), disposées soit par un empilement de  $[0/90^\circ]$ , soit par entrelacement entre eux, à cela s'ajoute une orientée verticalement pour renforcer la direction de l'épaisseur passant à travers les deux autres pour former un repère cartésien (Figure 9 (d)) [8]. Le tissage est connu sous le nom de "Orthogonal"

quand la structure de la préforme est constituée uniquement de ces 3 types d'orientations et d'empilement  $[0/90^\circ]$ .

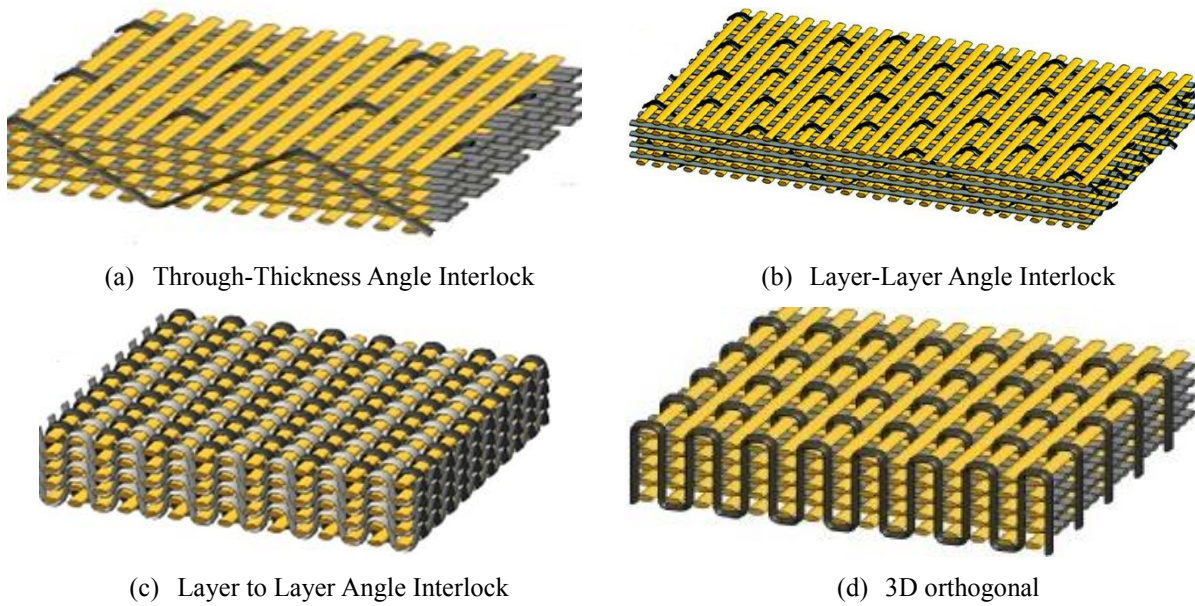


Figure 9 : Schémas de quelques armatures de tissage 3D.

En résumé, les architectures de tissage 3D peuvent être classées en deux catégories. Dans la première catégorie (angle interlock 3D et orthogonal 3D, Figure 9 (a) et Figure 9(d)), l'armature est obtenue à partir de trois torons : chaîne, trame et toron liant l'épaisseur. Celui-ci peut avoir une forme ondulée (Figure 9 (a)), ou être orthogonal à l'épaisseur Figure 9 (d)). À titre d'exemple, les disques de frein des avions sont réalisés en composites Carbone/Carbone avec des armatures en tissage orthogonal 3D (Figure 10).



Figure 10 : Armature tissée 3D dans les disques de frein d'avions.

Dans la deuxième catégorie, l'armature finale 3D est obtenue avec, uniquement, les torons classiques de chaîne et trame. La liaison dans l'épaisseur est réalisée par le toron de trame qui va onduler sur "n" colonnes de chaîne. Les combinaisons de liaison entre colonnes sont infinies et chaque configuration donnera lieu à des caractéristiques spécifiques. L'actualité nous montre que par un travail de recherche rigoureux, à tous les niveaux de développement, il est possible de réaliser des structures très performantes qui répondent à des cahiers des charges très sévères. L'exemple en est donné par l'aube fan du moteur LEAP développée et produite par la société SNECMA du groupe SAFRAN (Figure 11). Celle-ci est réalisée à partir d'armatures tissées de type interlock couche-couche (Figure 9 (b)).



Figure 11 : Architectures 3D interlock dans l'aube Fan du moteur LEAP de SNECMA.

Bien que très performantes, les structures obtenues à partir d'armatures tissées 3D sont très onéreuses. Elles ne peuvent être réservées qu'à des applications à hautes performances et très forte valeur ajoutée. Une alternative à ces technologies peut se trouver avec les armatures 2D renforcées dans l'épaisseur.

### **I.2.3 Les armatures 2D renforcées dans l'épaisseur**

#### **Le "Z-pin"**

Le "Z-pinning" ou "Z-pin", est l'une des toutes premières technologies développées pour le renforcement dans l'épaisseur des stratifiés classiques 2D [9], [10]. Elle a fait l'objet d'un grand nombre de publications. Le principe consiste en un "simple" épingleage ou cloutage à travers l'épaisseur du stratifié (Figure 12). Ce cloutage est automatisé et peut être réalisé avec des

renforts (clous ou épingles) de différentes matières. Cette technique est encore en application et en développement, notamment pour le renforcement transverse de stratifiés en pré imprégné pour des structures aéronautiques.

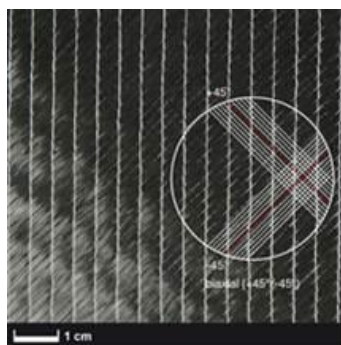


Figure 12 : Principe du cloutage "Z-Pin"[9].

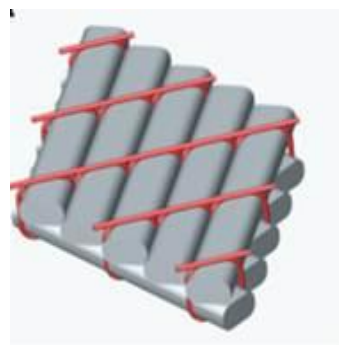
Bien que provenant d'une technologie différente, le "Z-pin" peut s'apparenter au stratifiés cousus, objets de notre étude, car l'objectif est dans le renforcement de la 3ème direction de l'espace.

### **Les stratifiés cousus**

Dans cette catégorie, on peut citer la famille des multidirectionnels cousus, appelés aussi NCF (Non Crimp Fabric). Il s'agit de nappes unidirectionnelles empilées suivant des angles variés et assemblées par une couture (Figure 13 (a)).



(a)



(b)

Figure 13 : Renforts de type NCF.

La particularité de cette famille de renforts est que le fil de couture n'a pas de rôle structurel. Il vise principalement à améliorer la maniabilité de la préforme. Il s'agit d'une technologie de couture particulière où le fil d'assemblage (généralement en thermoplastique) ne traverse pas les torons (Figure 13 (b)). Le fil d'assemblage n'étant pas structurel, ce type de renfort n'entre pas

dans le cadre de nos travaux. Cependant, de nombreuses études ont été dédiées à l'évaluation de la perméabilité des NCF. De ce point de vue, les résultats les plus pertinents seront abordés dans le paragraphe 3 de ce chapitre.

La couture de renforcement transverse (couture structurelle) s'apparente à la couture traditionnellement pratiquée dans le revêtement textile. Elle consiste à introduire des fibres continues dans le sens transverse pour renforcer une préforme 2D classique. Suivant la manière de solidariser les strates de renfort, on distingue cinq types de couture :

### **Le Lock Stitch**

Comme son nom l'indique, le Lock Stitch est une couture fermée. Ce mode de couture est l'un des plus courants. L'aiguille et le fil supérieur traversent la préforme, le crochet de la canette tire le fil supérieur et l'enlace avec le fil inférieur pour former une boucle au milieu de la préforme (Figure 14 (b)). La tension de la couture provient de deux parties : tension du fil supérieur et tension du fil inférieur.

Les deux faces de l'empilement doivent obligatoirement être en contact avec le mécanisme de couture. Le lock Stitch est très utilisé dans l'industrie du revêtement textile (habillement compris) en raison de son attrait esthétique.

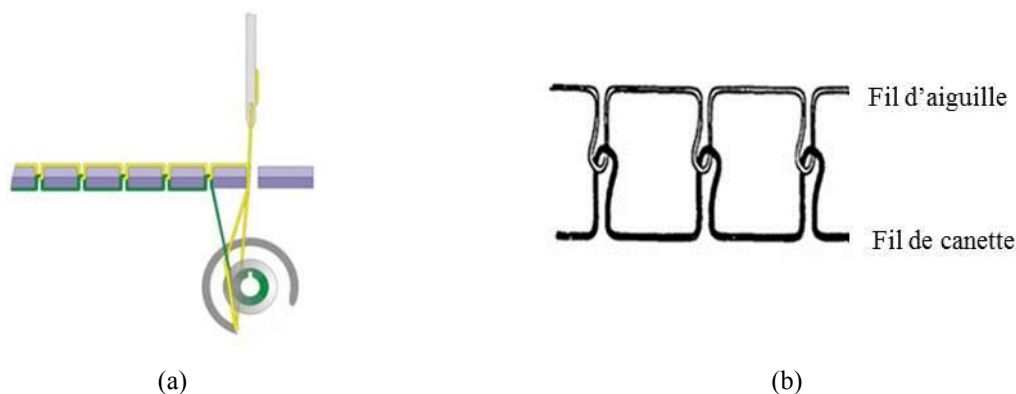


Figure 14 : Principe du Lock Stitch.

### **Le Chain Stitch**

Ce mode de couture permet la création d'un lien transversal en n'utilisant qu'un seul fil ( Figure 15). Il peut être réalisé avec un mécanisme similaire à celui de Lock Stitch.

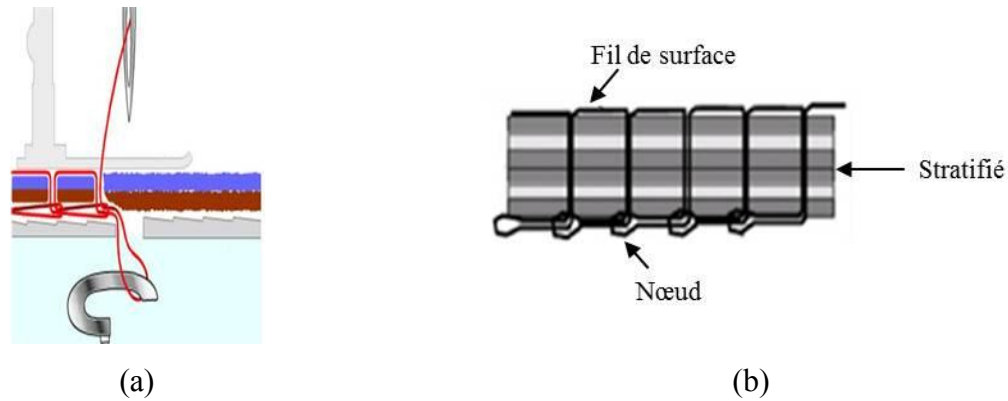


Figure 15 : Principe du Chain Stitch.

### Le Modified Lock Stitch

Dans ce mode de couture, la tension du fil est réglée de façon à ce que les nœuds se forment à la surface du stratifié, plutôt qu'à l'intérieur. Ceci minimise la distorsion du stratifié. Il s'agit de la méthode la plus employée, car c'est la plus simple et la moins pénalisante pour les renforts transversaux (Figure 16).

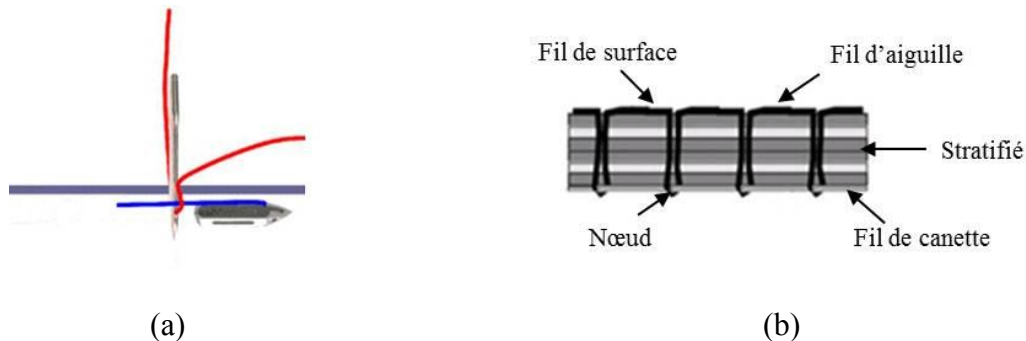


Figure 16 : Principe du Modified Chain Stitch.

Pour l'industrie du composite et du textile technique en général, certains modes de couture ont été développés pour être automatisés en faisant appel à la robotique. Parmi ceux-ci, on peut citer : Le Tufting, le One-Sided Stitching, et le Blind Stitching [11]. Ces trois procédés de couture sont développés et distribués par la société KSL GmbH (Allemagne). Depuis 2010, notre laboratoire est équipé d'un Robot muni de deux têtes de couture interchangeables en Tufting et OSS. Le détail du matériel et des paramètres de couture sont donnés dans le chapitre II.

## Le Tufting

Le Tufting est quelque peu différent des modes décrits ci-dessus, il s'apparente plus au Z-pinning, dans le sens où il s'agit d'une couture ouverte rappelant le cloutage. Le principe consiste en l'insertion d'un fil de renfort dans le sens Z ; qui peut être aussi exécuté sous différents angles. Le fil est introduit avec une très faible tension et l'aiguille se retire en laissant une bouclette. La profondeur de pénétration est ajustable. Le plus souvent, la bouclette est externe au stratifié et déborde de quelques millimètres (Figure 17).

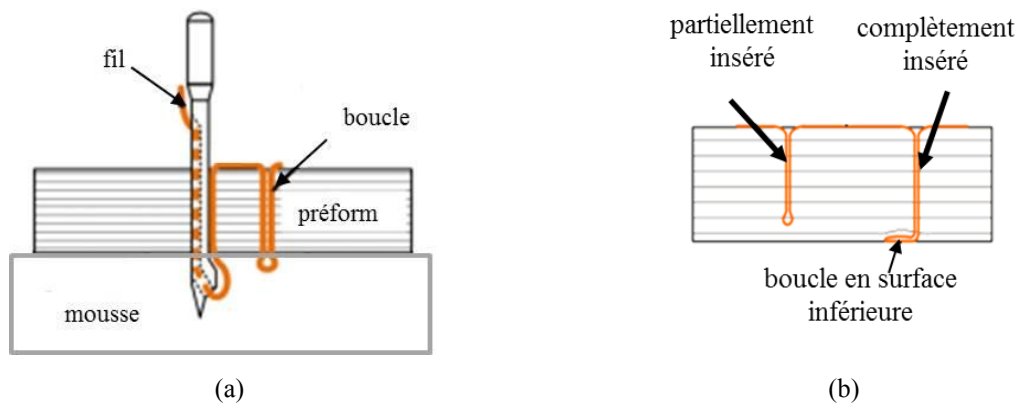


Figure 17 : Principe du Tufting.

## L'OSS

La technologie OSS, permet de réaliser des coutures fermées en n'utilisant qu'un seul fil. La deuxième aiguille, qui est en réalité un crochet, est synchronisée avec l'aiguille qui porte le fil. Elle pénètre la préforme à 45° et récupère le fil en face inférieure, ce qui permet de réaliser une boucle après le passage de l'aiguille dans l'épaisseur de la préforme (Figure 18).

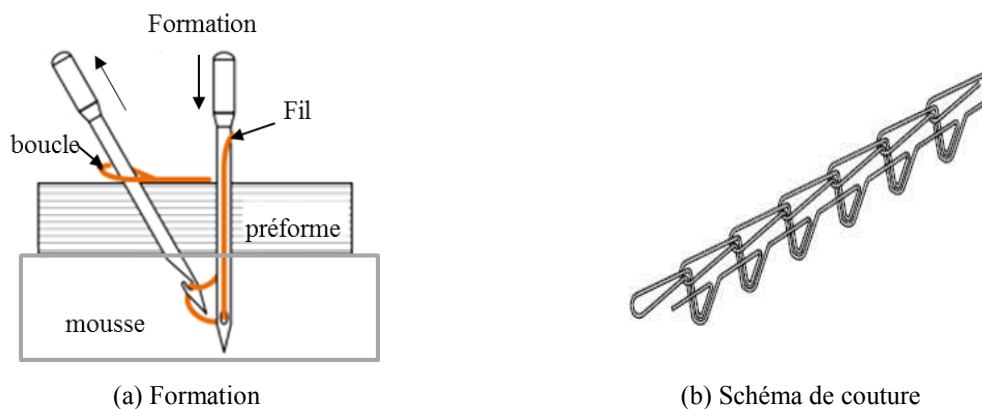


Figure 18 : Principe de la couture OSS.



### **Le Blind Stitching**

Dans la technique du Blind-Stitch, les couches de tissus secs sont liées par une aiguille courbe qui insère une boucle de fil unique dans une trajectoire courbe. L'extrémité de la boucle est saisie par un crochet séparé et verrouillée avec la boucle du fil précédent (Figure 19).

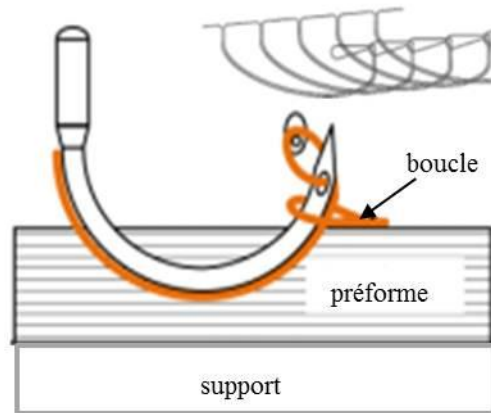


Figure 19 : Couture de type Blind-Stitching.

Un avantage indéniable des procédés de couture de type Tufting et Blind Stitching est que le renforcement ou l'assemblage des préformes peut être réalisé directement dans l'outillage destiné au moulage. Ce point peut être une source d'importants gains en productivité.

Cependant, particulièrement pour le Blind Stitching, le mode d'introduction de l'aiguille et son parcours au sein de la préforme provoquent des endommagements dans le renfort initial avec des conséquences sur les propriétés finales de la structure.

Notre étude s'est essentiellement focalisée sur la couture de type Tufting. Dans la suite nous présentons les travaux de la littérature consacrés aux apports, bénéfiques ou maléfiques, des coutures sur la perméabilité des préformes suivie par ceux dédiés à l'évaluation des propriétés mécaniques des stratifiés cousus.

### I.3 Perm éabilit édes tissus

#### I.3.1 Notion de perm éabilit édes milieux poreux

La perméabilité d'un milieu poreux décrit la facilité d'écoulement d'un fluide à travers ce milieu. On peut aussi la définir comme l'aptitude de ce milieu à se laisser traverser par un fluide. Elle est donc décrite comme une caractéristique intrinsèque du milieu poreux.

Historiquement, cette notion de perméabilité des milieux poreux a été établie par Henry Darcy en 1856. Pour expliquer le phénomène d'écoulement de l'eau à travers un milieu poreux, il mesure la chute de pression en fonction du débit. Il en déduit que le débit, divisé par la section  $A$ , est proportionnel au gradient de pression à travers la longueur d'écoulement  $\Delta L$ . La constante de proportionnalité est donnée par la perméabilité  $K$ , divisée par la viscosité du fluide (équation I-1).

$$Q = K \frac{A \Delta P}{\mu \Delta L} \quad (\text{I-1})$$

Où  $Q$  est le débit volumique du fluide ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $K$  est la perméabilité du milieu poreux ( $\text{m}^2$  ou DARCY),  $A$  est la section de l'écoulement ( $\text{m}^2$ ),  $\Delta P$ , la chute de pression (Pa),  $\Delta L$ , la longueur de l'écoulement (m) et  $\mu$  est la viscosité de fluide (Pa.s).

Cette relation phénoménologique s'appuie sur les hypothèses suivantes: Les forces d'écoulement sont dues à la viscosité (les forces d'inertie sont négligées) ; le milieu poreux est totalement saturé par une seule phase fluide ; les écoulements du fluide sont supposés laminaires ; le fluide n'a pas d'interaction physico-chimique avec le matériau.

L'expression précédente, appelée loi de Darcy [12], est généralement réécrite en faisant apparaître la vitesse d'avancée du fluide  $u$  :

$$u = \frac{Q}{A} = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad (\text{I-2})$$

Dans le cas des renforts fibreux utilisés dans les matériaux composites, la perméabilité est directement liée au taux volumique en fibres. Les études sur la variation de la perméabilité en fonction du taux volumique en fibres font souvent référence à l'équation de Kozney-carman. Cette équation a été développée à l'origine pour des milieux poreux granulaires, mais reste valide pour les milieux poreux constitués par des fibres [13].

En 1927, Kozeny abstrait un modèle pour prédire la perméabilité des milieux poreux de type granulaire idéal pour permettre de définir la perméabilité en fonction du taux volumique de fibres des renforts[14]. Sur cette base, Carman [15] propose une notion de rayon hydraulique qui lie le rayon capillaire au rayon moyen des particules, de sorte que tous les paramètres sont connus ou mesurables. Cette contribution marque une importante évolution dans la compréhension des écoulements dans les milieux poreux. Ce nouveau modèle est communément connu comme l'équation de Kozeny Carman (I-4):

$$K = \frac{R^2}{4K_s} \frac{(1-V_f)^3}{V_f^2} \quad (\text{I-3})$$

Avec,  $K$ : La perméabilité parallèle à l'axe des fibres ;  $R$ : Le rayon des fibres;  $K_s$  : la constante de Kozeny;  $V_f$ : la fraction volumique en fibres (ou Taux volumique en fibres  $\dot{R}TV_f$ ).

En 1990, Gebart [16] étudie la perméabilité de renforts unidirectionnels en combinant l'expérimentation, le modèle analytique et la simulation numérique. Il en déduit des formules décrivant les perméabilités perpendiculaire et parallèle à l'axe des cylindres (Figure 20), pour deux types d'arrangement de fibres : (a) un arrangement hexagonal ; (b) un arrangement carré, Figure 21.

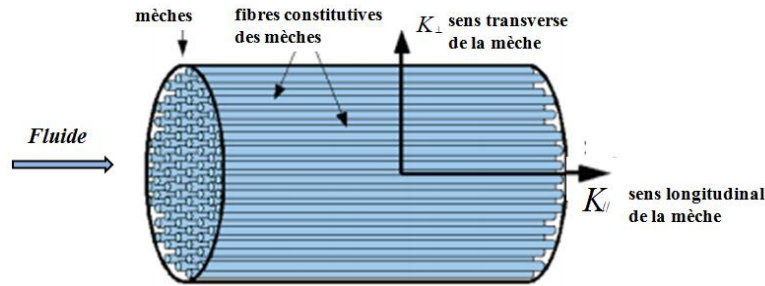
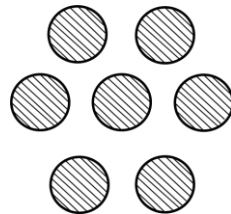
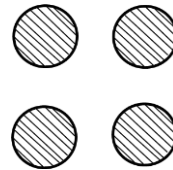


Figure 20 : Schéma simplifié des canaux dans le modèle de Gebart.



(a) Arrangement hexagonal



(b) Arrangement carré

Figure 21 : Arrangements du réseau de fibres dans le modèle de Gebart.

Son modèle s'exprime par les équations suivantes :

$$K_{\perp} = C_1 \left( \sqrt{\frac{V_{f\max}}{V_f}} - 1 \right)^{\frac{5}{2}} \quad (\text{I-4})$$

$$K_{\parallel} = \frac{8R^2}{C} \cdot \frac{(1-V_f)^3}{V_f^2} \quad (\text{I-5})$$

Où  $C_1$ ,  $C$  et  $V_{f\max}$  sont des paramètres dépendant du type d'arrangement des fibres, Tableau 1 :

Tableau 1 : Paramètres dépendant du type d'arrangement des fibres dans le modèle de Gebart.

Arrangement des fibres	$C_1$	$V_{f\max}$	$C$
Carré	$\frac{16R^2}{9\pi\sqrt{2}}$	$\frac{\pi}{4}$	57
Hexagonal	$\frac{16R^2}{9\pi\sqrt{6}}$	$\frac{\pi}{2\sqrt{3}}$	53

La comparaison des résultats expérimentaux à ceux du modèle montre des différences inférieures à 10 %. De plus, dans ce modèle, on constate que dans le sens longitudinal, l'équation a la même forme que celle de Kozeny-Carman. Ce point incite donc à étendre l'équation de Kozeny-Carman à d'autres types de renforcements. Costa [13] en comparaison avec d'autres modèles, constate que l'équation de Kozeny-Carman est l'un des meilleurs modèles pour prédire la perméabilité de différents milieux poreux non granulaires (renforts de type Mats par exemple), avec une expression des plus simples. Ainsi certains auteurs ont utilisé l'équation de Kozeny-Carman pour le calcul de la perméabilité de tissus en fonction de la variation de la fraction volumique [17], [18] ou la perméabilité de tissus déformée (augmentation de la fraction volumique avec l'angle de déformation du tissu), [18], [19]. Demaria et al.[17], montrent que l'équation de Kozeny-Carman reste applicable dans une gamme de variation de  $V_f$  inférieure à 14%.

### I.3.2 Perméabilités des tissus non cousus

Dans l'étude des écoulements au sein des préformes d'architecture complexe, il convient de distinguer les trois échelles de la Figure 22: l'échelle microscopique, l'échelle mésoscopique et l'échelle macroscopique. Cette dernière est essentiellement utilisée pour la détermination

expérimentale de la perméabilité. Les études aux échelles microscopique et mésoscopique sont souvent utilisées pour prédire soit la perméabilité de la préforme entière, soit les perméabilités locales.

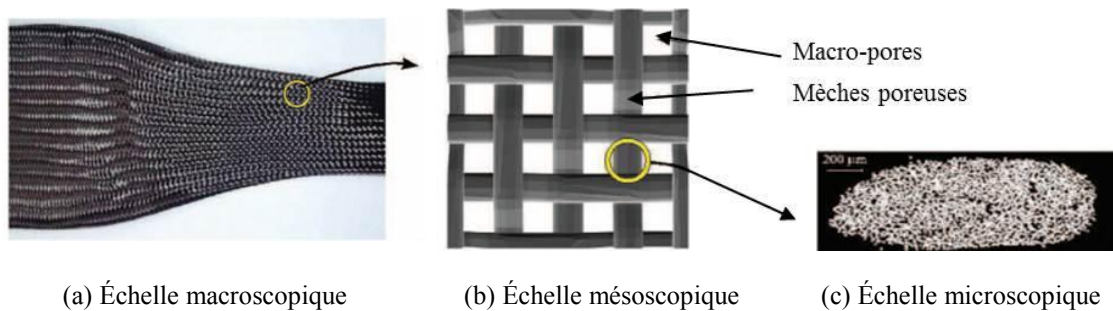


Figure 22 : Les différentes échelles dans la préforme.

Dans les renforts fibreux, il est actuellement admis, que l'écoulement du fluide d'imprégnation se fait suivant deux échelles : un écoulement inter-torons qui fait intervenir des forces visqueuses et un écoulement intra-torons qui fait intervenir des forces capillaires. Cet écoulement diphasique peut être responsable de la formation de macropores (inter-torons) ou micro-pores (intra-torons) selon la vitesse imposée au front d'avancée du fluide, [20] à [24]. A faible vitesse, l'écoulement capillaire est privilégié et induit la formation de macropores dans l'espace inter-torons. Pour des vitesses importantes du flux, l'écoulement est régi par les forces visqueuses dans l'espace inter-torons, ce flux se referme sur les torons partiellement imprégnés et donne naissance à des micro-pores intra-torons, Figure 23.

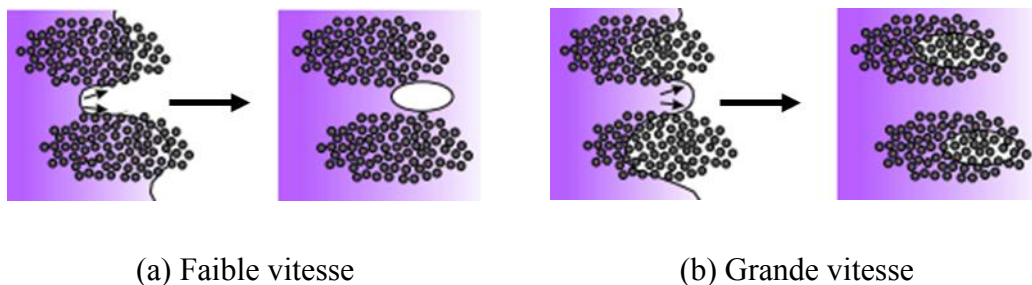


Figure 23: Ecoulement à double échelle dans les renforts fibreux[25].

Leclerc et Ruiz [22], montrent que dans le processus d'imprégnation, la formation des pores peut être contrôlée par un choix judicieux de la vitesse d'avancée du fluide. Ceci passe par la définition d'un nombre capillaire optimal (Figure 24).

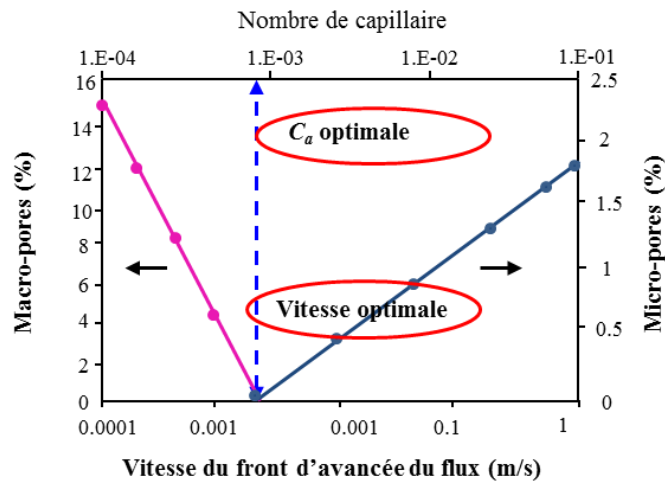


Figure 24: Taux de porosités en fonction de la vitesse d'écoulement et du nombre de capillaire [22].

Dans la prédiction de la perméabilité des préformes sèches, on peut distinguer deux domaines. Dans le premier, les études s'intéressent à établir des modèles analytiques à partir d'architectures et de géométries des porosités du milieu plus ou moins simplifiées et idéalisées [26]–[31].

L'autre domaine étant la simulation numérique qui complète les modèles analytiques et joue un rôle de reconstitution du processus de remplissage du moule à l'échelle macroscopique avec prise en compte des phénomènes aux échelles microscopique et mésoscopique. Ceci est réalisé avec des codes de calculs comme PAM-RTM [32], RTM-Worx [33], LIMS [17], RTMFLOT[34] ou VOF (Volume of Fluide) sur le logiciel FLUENT [35]–[37] pour simuler le front d'avancée du flux et le temps de remplissage (Figure 25). Ces codes de calcul utilisent la méthode des éléments finis [31], [38]–[40], ou la méthode des différences finies [16], [41]–[45], ou la méthode de Lattice Boltzmann [46]–[48] qui obtient la perméabilité par la résolution simultanée des équations de Navier-Stokes et Darcy dans des situations simplifiées.

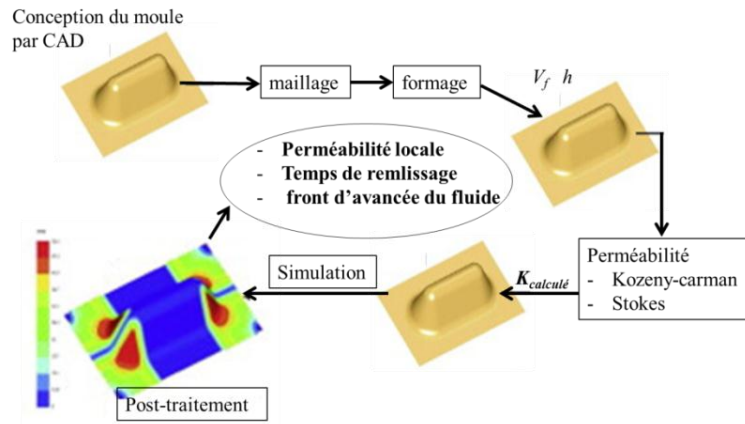


Figure 25 : Démarche de simulation dans le procédé RTM.

Pour les structures de très grands volumes tels que les coques de bateaux ou les pales d'Éoliennes, le risque de défaillance est souvent considéré comme très élevé. Pour améliorer la fiabilité et la robustesse de la technologie RTM et afin de réduire les coûts de développement, ces logiciels visent des procédures de contrôle "One-line" du processus de remplissage des moules [49].

Ceci passe par une définition, la plus réaliste possible, du paramètre clef du procédé : la perméabilité. Ainsi, de nombreuses études sont consacrées au développement des méthodes expérimentales de mesure de perméabilité macroscopique [26], [40], [50] à [54]. D'autres études ont focalisé leur attention sur les paramètres qui influencent la mesure de la perméabilité [55] à [60].

### I.3.3 Perm éabilit édes tissus cousus

À l'heure actuelle, le renforcement de préforme sèche par la couture semble avoir un bon potentiel de développement de par les différentes possibilités qu'il offre : différents types de couture disponibles, inclinaison, pas, et espacement des coutures. Ces nouvelles générations de renfort font l'objet de nombreuses études académiques et industrielles [61], [62]. Cependant, peu d'informations sont disponibles sur la relation entre la perméabilité et l'effet de la couture.

À l'heure actuelle, les études sur la perméabilité des préformes cousues sont surtout consacrées aux matériaux de type NCF (couture non structurante). Parmi ces études, on peut citer les travaux de Lundström [63] qui propose un modèle simplifié d'architecture pour les NCF. Ce modèle ne tient pas compte de la présence de la couture et conduit à des résultats divergents.

D'autres modèles détaillent les différents paramètres de la couture des NCF tels que, la densité de couture, le diamètre de la couture, la position de la couture, etc. Il en ressort que le fil de couture influence la perméabilité locale avec des conséquences sur la perméabilité globale [64] à [67].

Une des limitations des modèles analytiques est qu'il n'est pas possible de tenir compte de tous les paramètres en même temps. À titre d'exemple, la géométrie de la préforme est modifiée en fonction du compactage (taux de compression), il faut donc, dans chaque cas, corriger le modèle. Par conséquent, la mesure directe par expérimentation est plus recommandée [66]. Drapier et al. [68] mesurent la perméabilité dans l'épaisseur pour le NCF. En comparant les perméabilités  $K_z$  sur des préformes cousues et non cousues, ils constatent que la perméabilité augmente très significativement (61 fois) en fonction de la densité de couture. Ceci est attribué au grand nombre de trous laissés par l'aiguille autour des coutures.

Concernant les coutures structurantes, Chu et Cheng [69] trouvent que la couture en kevlar modifie l'architecture initiale en donnant un caractère isotrope, la perméabilité est améliorée de 87% dans la direction du stitching et réduite dans le sens perpendiculaire. Mitschang et al. [70], étudient la perméabilité de préformes de sergé 2-2 cousues avec des fils en fibre de verre et des fils en polyester, en utilisant le lock stitching. Ils montrent que la couture se comporte comme un obstacle qui réduit la perméabilité  $K_1$  de 48% pour les fortes densités de couture. Aucune tendance n'est trouvée pour  $K_2$ . Dans leurs travaux, Talvensaari et al. [71], constatent une amélioration de la perméabilité due à la présence des coutures.

Cette brève revue bibliographique montre que la grande majorité des études sur la perméabilité des renforts cousus sont focalisées sur les tissus de type NCF, ceux-ci étant très largement utilisés dans l'industrie du composite. En contrepartie, concernant les renforts cousus par coutures structurantes, peu d'études leur ont été consacrées. Ceci est très probablement lié au fait que ces technologies sont très récentes, pas assez démocratisées et encore en phase de développement.

La présente étude vient donc combler, quelque peu, ces lacunes.

#### **I.4 Comportement mécanique des préformes cousues**

Les premières structures composites cousues ont été développées au milieu des années 1980 par la NASA (National Aeronautic and Space Administration) et la société américaine Douglas



Aircraft. Un premier prototype a été réalisé sur une aile d'avion, moulée par le procédé RFI (Resine Film Infusion). Suite aux tests mécaniques avérés prometteurs, la NASA a lancé en 1989 un programme de recherche nommé ACT (Advanced Composites Technology) [72] suivie du programme ALAFS [73], destiné à évaluer le potentiel de réalisation d'un fuselage entier (ainsi que d'autres pièces structurales) par des composites cousus.

Ces deux plans de développement dédiés aux matériaux composites cousus ont été les pionniers et les promoteurs de ces types de technologie et matériaux. Les bénéfices attendus n'étaient pas restreints aux performances mécaniques, ils visaient aussi des réductions de coûts et de cycles de production.

Les atouts des composites ne sont pas limités à la haute rigidité et la résistance spécifique. Ils offrent également des avantages en termes de performance à la fatigue et d'utilisation de techniques avancées de fabrication pour réduire les coûts et les temps de cycles. Toutefois, l'utilisation des matériaux pour la réalisation des grandes structures est limitée en raison de leur sensibilité aux dommages et la difficulté à prédire leur comportement mécanique. Une méthode intéressante pour améliorer la tolérance aux dommages des stratifiés composites consiste à renforcer les caractéristiques hors-plan (l'épaisseur), à travers des technologies telles que le Z-pining, le stitching ou le tufting. L'avantage indéniable de la couture est qu'elle ne nécessite que l'ajout d'une seule étape dans le cycle de production (phase de couture) ; comparativement au tressage ou au tissage 3D qui utilisent des processus de fabrication compliqués et coûteux. Elle offre aussi l'avantage d'adapter le renforcement en fonction de l'application visée [74]–[76].

Selon Chung et al [77], la couture est très efficace pour retarder la propagation des fissures de délaminage, elle améliore considérablement le comportement interlaminaire. À ce titre, la résistance au délaminage en Mode I peut être améliorée de plus de 1500% et de 300 à 400 % en sollicitation de Mode II, [78]–[85].

De nombreuses études similaires ont été consacrées au potentiel de renforcement des coutures sur les matériaux composites. Gu et Zhili [6], en étudiant différents tissus de base, montrent que la couture provoque des modifications importantes dans l'architecture du renfort. Ils précisent que de petites perturbations dans cette architecture peuvent influencer significativement les propriétés mécaniques finales.

Du point de vue du comportement mécanique, les études montrent que le renforcement dans l'épaisseur est très souvent accompagné par des dégradations du stratifié initial. L'introduction de la couture produit une pression sur le stratifié et un écartement des fibres des plis du tissu de base lors du passage de l'aiguille. Cette ondulation induite a été identifiée comme étant le paramètre clef qui influence les performances mécaniques, dans le plan, des composites à renfort cousus [9], [86], [87]. L'angle final de désorientation dépend principalement du diamètre de l'aiguille, de celui du fil de couture, du mode de couture, de la tension du fil ainsi que du processus de consolidation au cours du durcissement. Les autres effets indésirables qui accompagnent la couture sont, [88] : la rupture et/ou l'éclatement des fibres du stratifié, les fissurations de la résine, une porosité croissante et des régions riches en résine. La Figure 26 illustre quelques défauts structuraux induits par les coutures. Les conséquences indésirables occasionnées par la couture ont été résumées par Dransfield et al. [89]. On y relève notamment des dégradations des propriétés en traction [78], [90], [91], en compression [79] et en flexion [83], [85], [92]. Beier et al. [74] ont également fait une synthèse des travaux de certains auteurs. Ils concluent que, compte tenu de la dispersion des données, les seules propriétés qui semblent clairement être améliorées par la couture seraient la résistance en compression postimpact (CAI) et la résistance au clivage inter laminaire (ténacité). Ils constatent aussi qu'il n'y a pas encore de consensus concernant la corrélation directe avec les paramètres de couture et les matériaux utilisés.

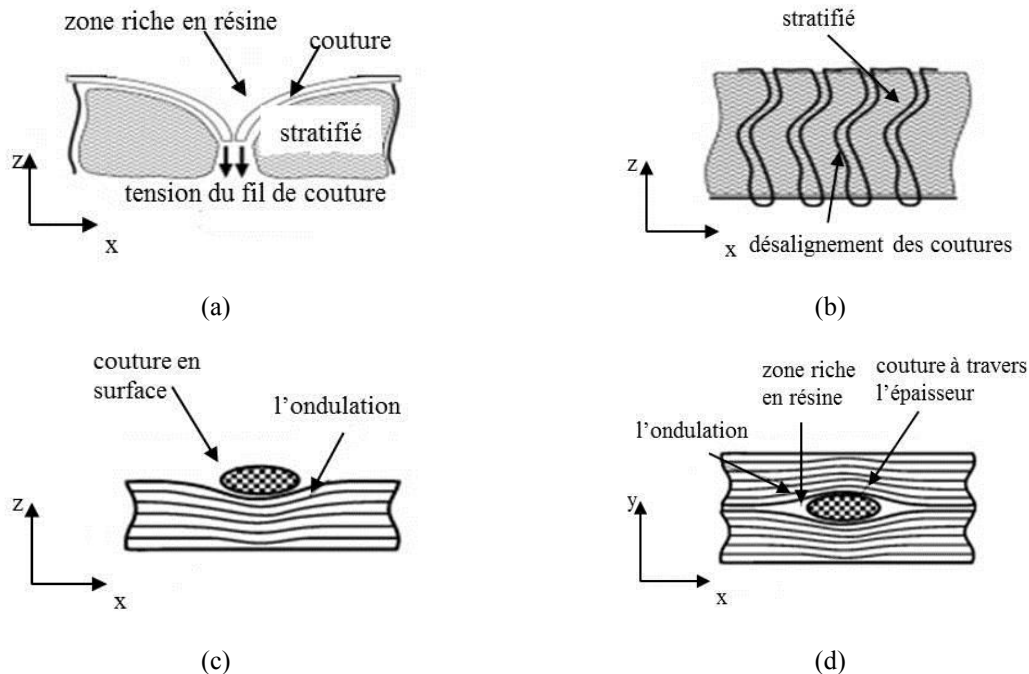


Figure 26 : Exemples de défauts structuraux induits par une couture [93].

Ce chapitre a mis l'accent sur les études bibliographiques menées sur les perméabilités des renforts cousus ainsi que sur les caractéristiques mécaniques des composites renforcés par couture. Ces deux groupements d'études sont distincts l'un de l'autre. Dans chaque groupe, les matériaux étudiés, les types de couture ainsi que les paramètres de couture sont disparates. Sachant que les performances mécaniques des structures composites sont directement tributaires du procédé de fabrication qui leur a donné naissance, il est intéressant d'étudier simultanément et dans les mêmes conditions de mise en œuvre, l'influence de certains paramètres de couture d'une part, du point de vue "process" : la perméabilité ; et d'autre part, du point de vue du comportement mécanique.

## Chapitre II Matériaux et mise en œuvre

### II.1 Procédée couture

Le matériau support de cette étude est un tissu de Carbone de type satin-5, référence G0926 de chez Hexcel. Il est tissé avec des torons en 6K en carbone HR, sa masse surfacique est de 366 g/m<sup>2</sup>.

Les préformes cousues ont été réalisées, au sein de notre laboratoire, avec un matériel développé par la société KSL GmbH (Allemagne). Ce matériel a été acquis par le laboratoire Roberval de l'Université de Technologie de Compiègne dans le cadre d'un CPER (Contrat de Plan Etat-Région), avec l'aide financière de la région Picardie et du FEDER. Il est essentiellement constitué d'un robot KUKA (Allemagne) muni de deux têtes de couture interchangeables et d'une tête de découpe par ultrason (Figure 27).

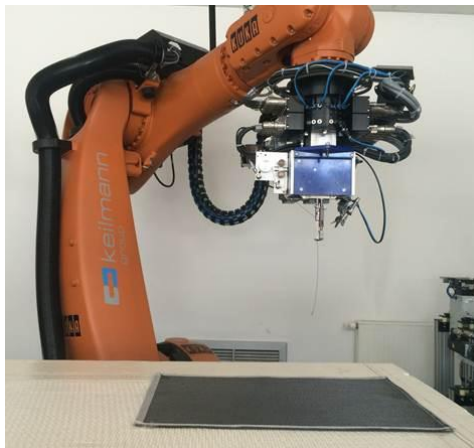


Figure 27 : Robot de Couture et ses accessoires.

Notre laboratoire dispose ainsi de deux modes de couture :

- Un procédé à couture ouverte : le "Tufting" ;
- Un procédé à couture fermée appelé "On Side Stitching" (cf.chapitre I).

#### II.1.1 Paramètres de couture et mode opératoire

Les coutures ont été réalisées avec des aiguilles d'un diamètre de 2 mm. Le fil de couture est en fibre de Carbone de référence Tenax-J HTR 40 F15, fourni par la société **SCHAPPE** (France).

Ce fil est constitué par l'entrelacement de torons de 1K. Les préformes de faibles épaisseurs ont été cousues avec un fil de  $2 \times 1$  K. Pour les préformes épaisses de 20 mm, suite à des problèmes de rupture du fil lors de la pénétration dans la préforme, celles-ci ont été cousues avec un fil deux fois plus épais ( $2 \times 2$  K).

Cette étude est essentiellement focalisée sur la couture de type "Tufting". Pour ce type de couture, nous avons étudié trois densités de couture, en faisant varier simultanément le pas et l'espacement des rangs de couture (Figure 28). Sur cette figure le pas de couture  $S_x$  représente la distance entre deux points d'insertion de l'aiguille. L'espacement entre les rangs de coutures est représenté par la distance  $S_y$ .

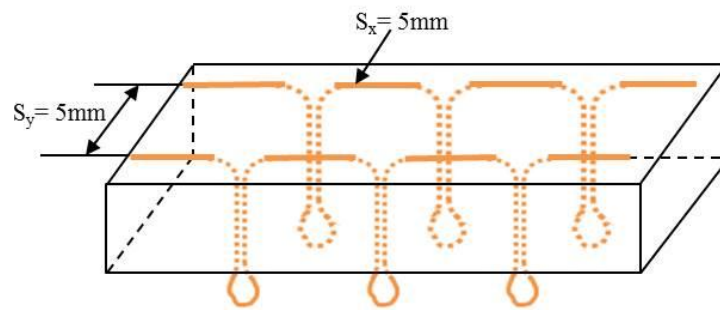


Figure 28: Schématisation du pas de couture et de l'espacement entre rangs de couture.

Le choix des densités de coutures a été fait de sorte à avoir, chaque fois, une densité double de la précédente. Nous obtenus ainsi les densités de couture suivantes :

$$S_x \times S_y = 5 \times 5 \quad \Rightarrow \quad 4 \text{ points de couture /cm}^2$$

$$S_x \times S_y = 7 \times 7 \quad \Rightarrow \quad 2 \text{ points de couture /cm}^2$$

$$S_x \times S_y = 10 \times 10 \quad \Rightarrow \quad 1 \text{ points de couture /cm}^2$$

Le réglage de la profondeur de pénétration de l'aiguille permet de laisser, en face inférieure, des bouclettes d'environ 2 mm. Cette longueur a été fixée arbitrairement. La Figure 29 donne un aperçu des faces supérieure et inférieure d'une préforme cousue par Tufting : (a), (b) en pas de 5 ; (c), (d) en pas de 7 et (e), (f) en pas de 10.

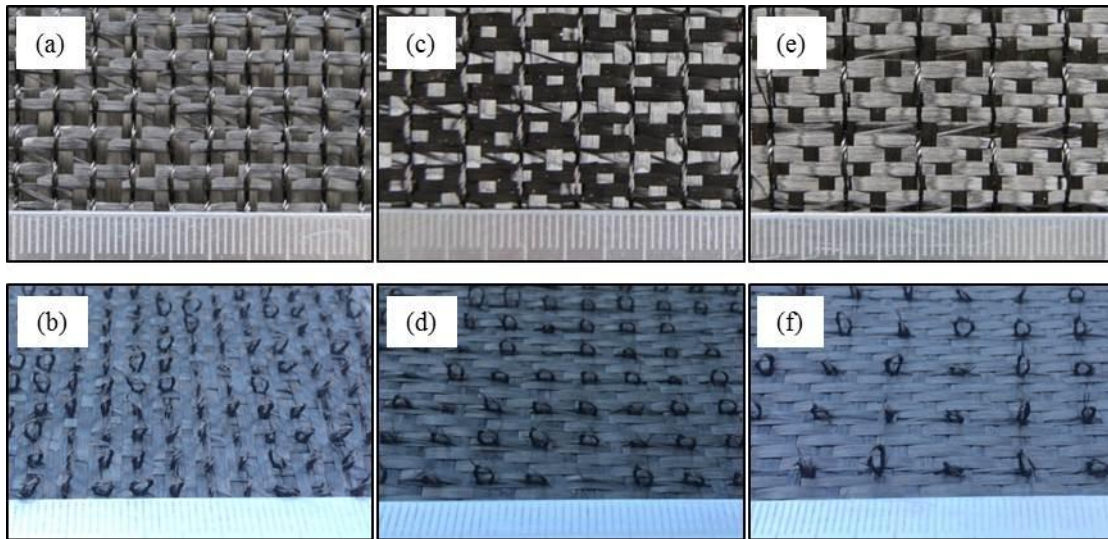


Figure 29: Illustration des trois densités de coutures sur les faces supérieures et inférieures des préformes.

Pour permettre la réalisation de ces bouclettes (pénétration de l'aiguille), les préformes sont fixées sur des panneaux de mousse de Polystyrène extrudé, de 30 mm d'épaisseur, lui-même fixé sur la table de couture du robot. Après couture, les bouclettes se trouvent incrustées dans le pain de mousse. La préforme est alors détachée délicatement de ce support.

### II.1.2 Anisotropie additionnelle introduite par la couture

L'anisotropie propre aux tissus 2D classiques est modifiée par la présence des coutures. Pour maintenir des pseudo plans d'orthotropie nous avons convenu que les rangs de couture seraient réalisés toujours parallèlement au sens chaîne des tissus. Ainsi, pour les structures cousues, les axes du repère d'orthotropie seront définis de la façon suivante :

Axe 1 = sens chaîne = direction de la couture ;

Axe 2 = sens trame = direction perpendiculaire aux rangs de couture ;

L'axe 3 reste inchangé, en étant le sens de l'épaisseur (Figure 30).

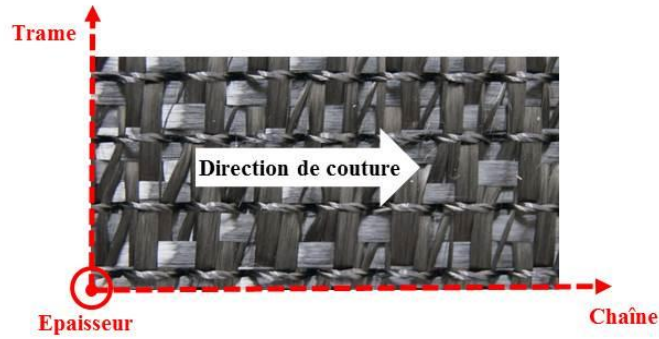


Figure 30: Repères d'orthotropie des préformes cousues.

### II.1.3 Taux volumique en fibre spécifique aux coutures

Pour les préformes cousues, le taux volumique en fibre de la structure finale sera constitué par le TVf du renfort tissé auquel s'ajoute le TVf du fil de couture. Dans l'absolu, la comparaison des performances d'une structure cousue à celles d'un stratifié classique (non cousu), doit être faite pour des TVf identiques, car comme nous le verrons dans les chapitre III et IV, les perméabilités et les performances mécaniques sont directement liées au TVf. En respectant cette condition, les préformes cousues devraient avoir soit moins de couches de renfort que les non cousus, soit des épaisseurs plus importantes (réduction du compactage). Ainsi, il est délicat de définir de quelle manière on fait intervenir la couture dans les grandeurs évaluées.

Notre démarche a été de considérer et comparer des structures identiques du point de vue du nombre de couches empilées. Pour atteindre des TVf proches entre structures cousues et non cousues, nous avons utilisé les jeux d'entrefers disponibles sur le moule de mesure de perméabilité et ceux du RTM.

Cette démarche a été adoptée aussi bien pour l'évaluation des perméabilités que dans la réalisation des plaques destinées aux essais mécaniques.

## II.2 Mise en œuvre des plaques composites

Avec les moyens disponibles dans notre laboratoire, nous pouvons réaliser les structures (plaques) composites aussi bien par le procédé d'infusion que celui du RTM (**R**ésine **T**ransfert **M**olding). Le procédé d'infusion est beaucoup plus facile à aborder, cependant, le TVf est très difficilement contrôlable. Le procédé RTM, quant à lui, est plus technique et nécessite plus de moyens.

Cependant, il possède l'avantage indéniable de garantir les TVf souhaités et d'assurer une régularité de la qualité des pièces obtenues. Les plaques nécessaires aux essais mécaniques ont donc été réalisées par ce procédé.

Le RTM appartient à la famille des procédés de type LCM, comme **L**iquide **C**omposite **M**olding. Les structures composites sont obtenues par injection de résine dans un moule fermé rigide. Les principales étapes de ce procédé sont résumées par la Figure 31.

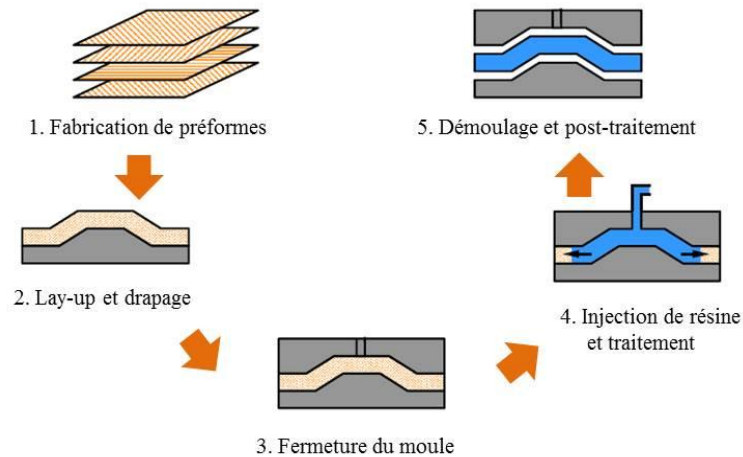


Figure 31 : Principales étapes du procédé de moulage RTM.

Plus exactement, nos plaques ont été obtenues par VARTM (Vaccum Assisted RTM). Cette variante est à l'heure actuelle, communément pratiquée, car elle permet de réduire aussi bien les pressions d'injection que les taux de micro-vides dans la pièce finale.

### II.2.1 Équipements et outillages

Les tissus carbone en satin de 5, ont été imprégnés par de la résine Epoxy de type RTM6 mono composant ; résine qualifiée en aéronautique. Cette résine nécessite d'être injectée à 80°C dans un moule chaud. Pour cela nous avons utilisé un équipement adapté constitué principalement d'une machine d'injection RTM mono composant développée par la Ste Matrasur. Cette Machine de laboratoire a la particularité d'autoriser des injections à débit constant ou à pression contrôlée pour des volumes injectables allant de quelques ml à environ 5 litres. La régulation thermique de l'outillage (moule) est assurée par une enceinte thermique. La Figure 32 donne un aperçu de l'installation dans son ensemble.





Figure 32: Equipement pour l'injection RTM à chaud.

Pour les besoins de cette étude, nous disposons de deux moules RTM en Aluminium (Figure 33), ayant des empreintes de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ . Ces moules ont été conçus, par nos soins, avec un double objectif : permettre la réalisation de plaques de différentes épaisseurs et assurer un front d'avancé de la résine unidirectionnel. La profondeur des deux empreintes est respectivement de 8 et 20 mm. Ainsi, par ajout de cales appropriées, nous pouvons réaliser des plaques de 2 à 20 mm par pas de 2 mm.

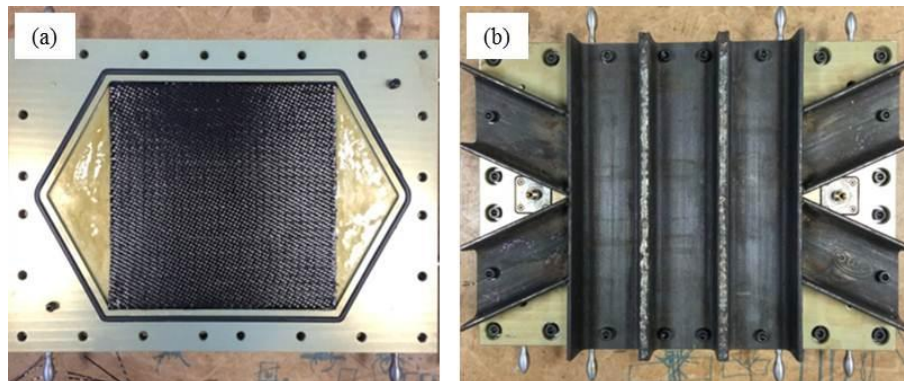


Figure 33: Moule RTM : (a) préforme dans l'empreinte ; (b) Moule refermé et consolidé par des raidisseurs.

### II.2.2 Protocole d'injection de la résine

Toutes les plaques ont été injectées suivant le même protocole. Les grandes lignes de ce protocole sont décrites ci-dessous :

- Découpe aux ultrasons de la préforme et mise en place dans le moule ;
- Fermeture du moule, test d'étanchéité au vide, à T ambiante et à 80°C ;
- Branchement de la tuyauterie ;
- Décongélation de la résine ;
- Prélèvement de la quantité nécessaire et remplissage de la culasse.
- Mise en chauffe de la culasse et de l'enceinte thermique (à 80°C).
- Dégazage de la résine pendant la chauffe.
- Injection de la résine, à débit constant, après stabilisation des températures.
- Gavage jusqu'à des pressions voisines de 6 bars.
- Déclenchement de la réticulation à 180°C pendant 2 heures.
- Démoulage après refroidissement.

### II.2.2.1 Découpe US et drapage

Les préformes ont été découpées avec le robot muni de sa tête de découpe à UltraSon. Ceci afin d'assurer des dimensions d'empreintes précises de  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ .

Lors de la mise en place dans le moule, pour éviter les effets de bords lors de l'injection et la création de zones sèches [94], [95], les bords de l'empreinte parallèles à la direction du flux de remplissage ont été densifiés avec des torons unidirectionnels, Figure 34.

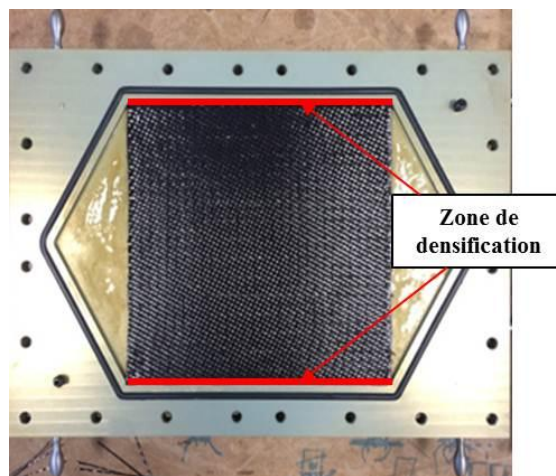


Figure 34 : Mise en place de la préforme dans le moule.

D'autre part, les préformes épaisses en 20 mm ont été cousues, soit partiellement (sur la moitié de la surface de l'empreinte), soit cousues avec deux différentes densités de coutures. Dans ces

cas, pour éviter de provoquer des flux différentiels entre ces zones, nous avons pris la précaution de fixer la direction du flux perpendiculairement à la direction des coutures (Figure 35).

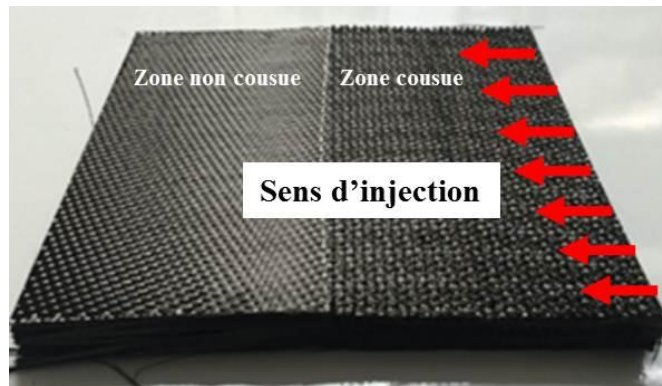


Figure 35 : Exemple de préforme cousue partiellement.

En prévision des tests mécaniques, nous avons défini deux types de plaques à réaliser : des plaques de faible épaisseur (3 et 4 mm) pour atteindre les caractéristiques mécaniques planes et des plaques épaisses (20 mm) pour les caractéristiques hors-plan. Le Tableau 2 explicite ces différentes plaques réalisées ainsi que leur destination respectives.

Tableau 2 : Constitution des plaques réalisées et leur destination.

Type de la plaque	Epaisseur (mm)	Nombre de couches	Utilisation des plaques
Non cousu	$\approx 3$	6	- Traction longitudinale - Traction transversale - Traction à $\pm 45^\circ$
5-5 cousu	$\approx 4$	8	
7-7 cousu			
10-10 cousu			
Non cousus	$\approx 20$	40	- Compression sur cube - Flexion poutre courte
5-5 cousu			
7-7 cousu			
10-10 cousu			

### II.3 Evaluation de la qualité des plaques moulées

Après réalisation des plaques, nous avons évalué leurs qualités à travers la mesure du taux volumique en fibre, l'évaluation du taux de porosité ainsi que des observations micrographiques des surfaces.

### II.3.1 Taux Volumiques en fibres

Pour un volume de composite donné, le TVf est le rapport du volume de fibres sur le volume total du composite.

$$TVf = \frac{V_f}{V_c} \quad (II-1)$$

Il est obtenu à travers les fractions massiques et la connaissance des densités de la fibre et de la matrice qui le constituent :

$$TVf = \frac{\rho_m \cdot W_f}{\rho_f \cdot W_{fm} + \rho_m \cdot W_f} \quad (II-2)$$

Avec  $W_f$  la masse du réseau fibreux et  $W_m$  celle de la résine ( $W_m = 1 \text{ } \hat{R} \text{ } W_f$ ). Les densités de la fibre, de la résine et du composite sont mesurées avec une balance de précision de laboratoire munie d'un kit de densimétrie. La densité du solide est obtenue par mesurer de la masse de l'échantillon dans l'air, puis dans un fluide (Figure 36). Avant toute mesure, les échantillons sont étuvés pendant 40 heures à 45°C. Cela permet de les débarrasser de toute trace d'humidité. Chaque résultat par catégorie est obtenu par la moyenne de cinq mesures.

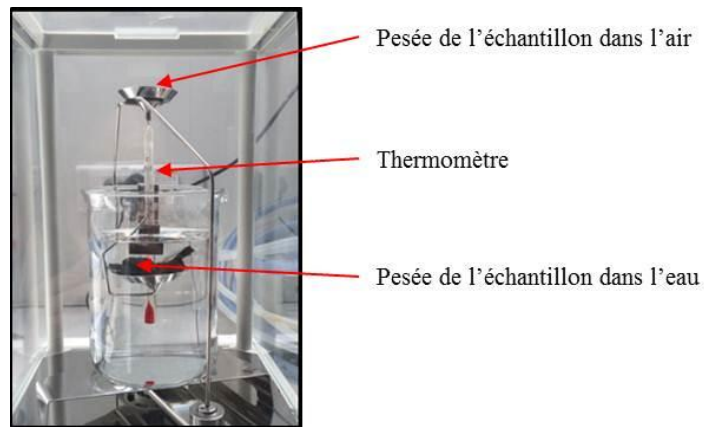


Figure 36 : Kit de densimétrie.

Pour obtenir la masse des fibres contenues dans le volume, il faut séparer le réseau fibreux de la matrice qui le lie. Ce réseau fibreux du composite est séparé de la matrice soit par calcination, soit par dégradation chimique. La calcination consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (ASTM D2734), pour provoquer la combustion de la matière organique et vaporiser ainsi la matrice. Cette technique, facilement abordable, est très bien adaptée à des composites à

base de fibre de verre. Dans le cas des composites à base de fibre de carbone, celui-ci réagit avec le dioxygène de l'air pour former du CO ou CO<sub>2</sub>. Les fibres risquent de se volatiliser en même temps que la résine. Pour ce type de fibres on préfère la dégradation par attaque acide, détaillée par les normes NF EN 2564. La dégradation du réseau polymère macromoléculaire est faite à l'aide d'acide sulfurique concentré, d'eau oxygénée et de la température. Cette méthode nécessitant quelques connaissances en termes de manipulation de réactifs chimiques dangereux, ainsi que des équipements adaptés tels que des hottes aspirantes munies de filtres. Pour contourner ces difficultés, on fait recours à la méthode de calcination décrite précédemment. Pour éviter la volatilisation des fibres de carbone, on utilise des fours à pyrolyse sous azote.

Dans notre étude, faute de moyens adaptés, nous avons séparé le réseau fibreux par calcination dans un four à pyrolyse classique (sans apport d'azote). Cependant, nous avons pris les précautions nécessaires pour éviter (ou minimiser) la réaction des fibres de carbone avec l'air. Des essais préliminaires ont permis de fixer la température minimale qui assure une calcination de la résine, pour un temps de séjour minimal dans le four. D'autre part, dans ces mêmes conditions de températures, nous avons évalué la perte de masse de fibres de carbone nues afin d'évaluer la perte de masse de ces fibres nues. Ces essais ont montré que la température de calcination optimale était de 470°C. D'autre part, nous avons constaté que la perte de masse moyenne des fibres nues était de l'ordre de 1 %.

Les résultats de TVf présentés dans le Tableau 3, sont donc obtenus dans ces conditions. Chaque valeur est la moyenne d'au moins quatre mesures. Nous avons conscience que ces valeurs n'ont pas été obtenues en respect des règles de l'art, mais elles permettent de donner un ordre de grandeur très acceptable, d'autant plus qu'il s'agit d'une étude comparative entre structures cousues et non cousues.

Tableau 3 : Résultats des TVf mesurés sur les différentes plaques.

Type de plaque	TVf (%) plaques fines	TVf (%) plaques épaisses
Non cousue	40.9 ± 0.5 %	43.4 ± 0.6 %
Pas de 10	41.6 ± 0.9 %	44.4 ± 0.7 %
Pas de 7	42.3 ± 0.6 %	44.7 ± 0.5 %
Pas de 5	43.3 ± 0.3 %	45.5 ± 0.5 %

Sur ce tableau, on constate que les plaques épaisses possèdent des TVf supérieurs de 2 à 2.5 % à ceux des plaques fines. Ceci s'explique par la plus grande quantité de fil introduit dans l'épaisseur, mais aussi par la taille du fil de couture utilisé (2K pour les fines et  $2 \times 2K$  pour les épaisses), comme signalé au début de ce chapitre. Ces résultats nous montrent aussi que malgré les réserves émises sur la méthode d'obtention du TVf, celle-ci est assez précise pour quantifier la variation du TVf en fonction de la densité de couture et la différence de TVf due à la taille du fil de couture.

### II.3.2 Mesure des taux de porosité

La porosité peut être déterminée à travers des mesures de densité. Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre les densités théorique et réelle du composite. La différence entre les deux donne le taux de porosité. Le taux de porosité peut donc, être estimé par l'expression suivante :

$$V_p = \frac{\rho_t - \rho_r}{\rho_t} \quad (\text{II-3})$$

$\rho_t$  est la densité théorique du composite et  $\rho_r$  la densité réelle du composite. Il sera donc obtenu à travers la mesure des densités du composite, de la fibre et de la résine, avec la connaissance du TVf (méthode décrite précédemment). Le Tableau 4 présente les taux de porosité obtenus pour les différentes plaques. Chaque valeur est une moyenne quatre mesures.

Tableau 4 : Taux de porosité des plaques fabriquées.

Type de plaque	$V_p$ (%) plaques fines	$V_p$ (%) plaques épaisses
Non cousue	$0.59 \pm 19 \%$	$1.08 \pm 13 \%$
Pas de 10	$0.94 \pm 8 \%$	$1.10 \pm 15 \%$
Pas de 7	$1.04 \pm 13 \%$	$1.38 \pm 10 \%$
Pas de 5	$1.05 \pm 15 \%$	$1.98 \pm 13 \%$

Ces résultats nous montrent que les plaques cousues ont des taux de porosité systématiquement supérieurs à ceux des plaques non cousues. De plus, ce  $V_p$  augmente avec l'augmentation de la densité de couture. On remarque également que les plaques cousues épaisses ont des  $V_p$

supérieurs à ceux des plaques cousues fines. Ces trois remarques montrent que les coutures jouent un rôle important dans l'apparition des porosités. Cette étude a donc été poursuivie par une analyse micrographique présentée dans le paragraphe ci-dessous.

### II.3.3 Analyse micrographique

L'analyse d'images issues de microscopie est très utilisée dans l'étude de la teneur en fibres [96] [98] et en porosités des composites [99] [102]. Ce type d'analyse conduit, soit à une évaluation quantitative, soit à une reconnaissance de formes. Appliquées aux matériaux composites, ces méthodes reposent sur le fait que les porosités et les fibres sont des *caractéristiques volumiques*. Elles sont représentées par des *événements plans* (indicateurs plans), correspondant à l'intersection entre le volume tridimensionnel et le plan de l'image. L'exactitude des résultats obtenus repose donc sur l'hypothèse majeure que l'échantillonnage choisi pour représenter la structure est I.U.R. (Isotrop, Uniform and Random Aléatoire) [101]. Lorsque les conditions sont réunies, des méthodes mathématiques permettant de calculer des données tridimensionnelles à partir de mesures réalisées sur un nombre limité de coupes bidimensionnelles : méthode de la stéréologie [103].

Concernant notre étude, de par la présence des coutures, l'application de ces méthodes pour quantifier les taux volumiques de porosité ou de fibre (TVf), devient très délicate à mettre en œuvre. La principale difficulté étant la réalisation de coupes précises dans les plans des coutures. La méthode d'analyse d'image a donc été appliquée, essentiellement, de manière qualitative, dans le but de localiser les porosités mesurées au paragraphe II.3.2.

Comme pour toute technique d'observation microscopique, la pertinence des résultats obtenus est tributaire de la qualité de préparation de l'échantillon. Dans la découpe des échantillons (disque diamanté), les plans de coupe ont été réalisés perpendiculairement aux rangs de couture. Une attention particulière a été prise pour que les plans de coupe passent par le plan milieu des coutures. Les coutures ayant des diamètres moyens de l'ordre de 900 microns, cette opération est particulièrement délicate à réaliser. Avant l'observation proprement dite, les échantillons ont été soigneusement polis avec des disques de polissage de taille 800, 1200, 2000 et 4000. Un lustrage final est obtenu avec une solution de pâte diamantée à 1 micron.

### II.3.3.1 Acquisition des images et cartographie

Les observations ont été réalisées sur un microscope optique de marque Olympus. Les sections des surfaces analysées allaient de  $6 \times 3 \text{ mm}^2$  à  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  pour les plus épaisses. Compte tenu de la taille importante de ces surfaces, une information à l'échelle macroscopique de la présence des porosités ne peut être obtenue que par une cartographie, c'est-à-dire, par assemblage d'images successives. Ces images successives ont été obtenues par déplacement manuel de l'échantillon sous l'objectif du microscope. Les prises de vue ont été réalisées de façon à avoir un chevauchement d'une prise à l'autre. Ceci afin de disposer de repères communs (d'une image à l'autre) pour la reconstitution de l'image finale. Le chemin d'acquisition des images successives est représenté par la Figure 37.

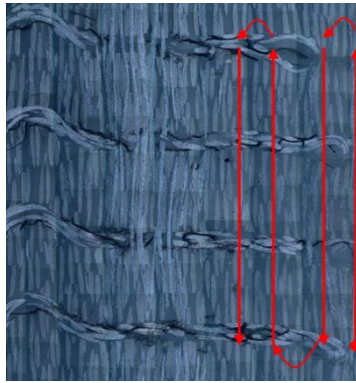


Figure 37 : Chemin d'acquisition des images.

L'assemblage des images a été réalisé par **GIMP 2**, un logiciel d'édition et de retouche d'image. En utilisant la fonction calque et en jouant sur la transparence, les images sont superposées deux à deux, pour détecter visuellement les correspondances, puis assemblées les unes aux autres.

### II.3.3.2 Résultats

L'analyse des images reconstituées a été réalisée avec le même logiciel **GIMP 2**. Sur une image au microscope optique, le contraste dépend de la capacité des différents constituants de l'échantillon à réfléchir avec plus ou moins d'intensité la lumière. Ainsi, dans le cas d'un composite à fibres de carbone et à matrice polymérique, les fibres apparaissent plus claires que la matrice et la matrice, à son tour, plus claire que les porosités. Sachant que les niveaux de gris de chaque pixel de l'image varient de 0 (pour la couleur noire) à 255 (pour la couleur blanche), les fibres correspondent donc aux pixels de niveaux élevés, la matrice aux pixels de niveaux



intermédiaires et les porosités aux pixels de bas niveaux. Par différenciation des niveaux de gris, il est possible de quantifier ces trois éléments sur la surface d'observation. Concernant la détection des porosités, l'ensemble des auteurs [99] à [102] s'accorde sur l'utilisation de la méthode seuil. Celle-ci consiste à fixer un niveau de gris en dessous duquel les points de l'image correspondants sont constitutifs des porosités (Figure 38).

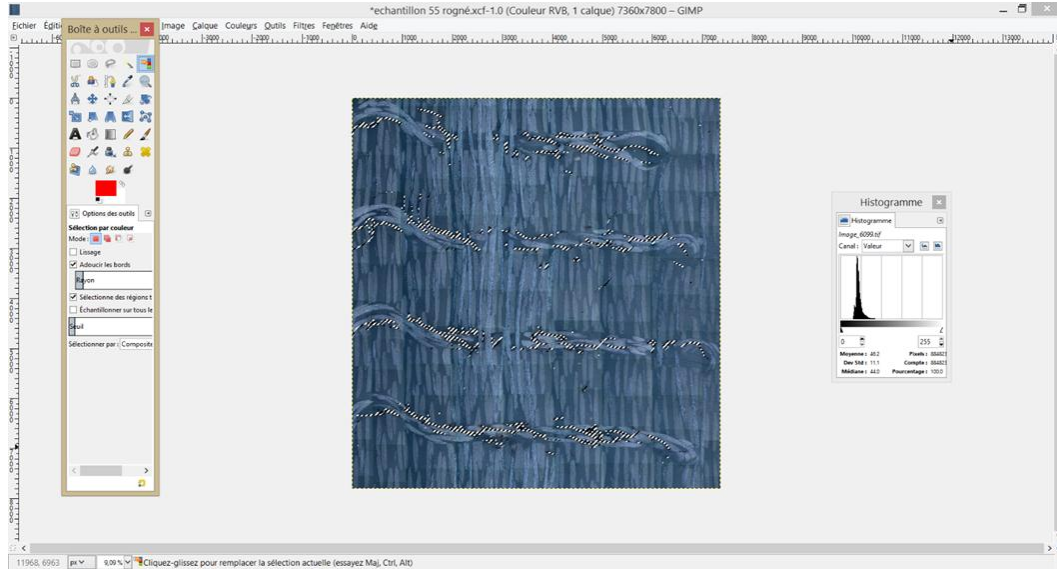


Figure 38 : Illustration de la méthode seuil pour la détection des porosités.

Après traitement par la méthode seuil, les pixels correspondant aux porosités ont été teints en rouge pour mieux contraster avec le fond bleuté de l'image. La Figure 39 donne un aperçu du rendu pour un échantillon de 20 mm d'épaisseur, cousu en pas de 5 mm.

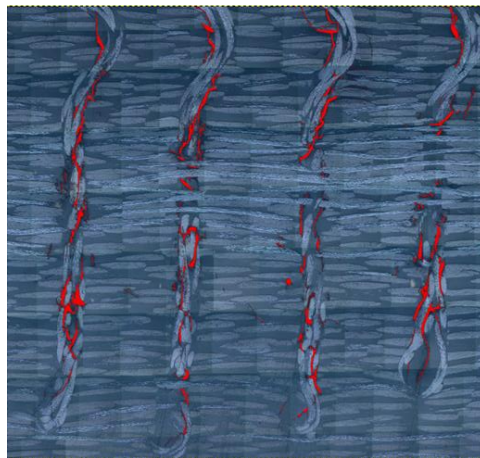


Figure 39 : Cartographie des porosités d'un échantillon cousu en pas de 5.

En Figure 40 sont représentés les échantillons de 20 mm cousus en pas de 7 et en pas de 10, ainsi qu'un échantillon non cousu. Cette figure montre que pour les échantillons cousus les porosités sont localisées dans les coutures ou dans le voisinage proche de ces coutures, alors que l'échantillon non cousu n'en contient pas. D'autre part, certaines formes et dispositions de ces porosités montrent qu'il s'agit plus tôt de fissures localisées dans des zones riches en résines, au sein ou à proximité des coutures. Ce constat est confirmé par les cartographies des échantillons prélevés à partir des plaques de faibles épaisseurs : 3 mm pour le non cousu et 4 mm pour les cousus en pas de 5, 7 et 10, (Figure 41).

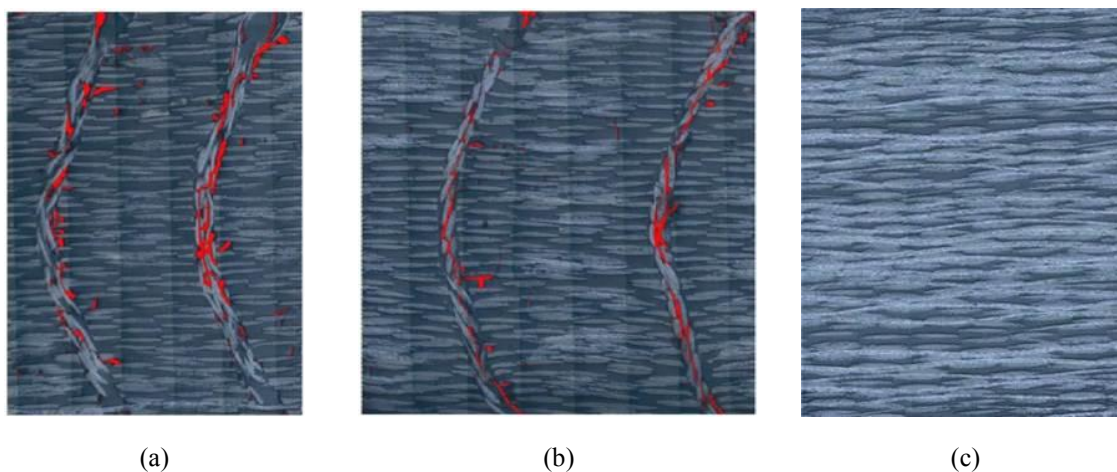


Figure 40 : Cartographie des échantillons cousus en (a) pas de 7 ; (b) pas de 10 et (c) sans coutures.

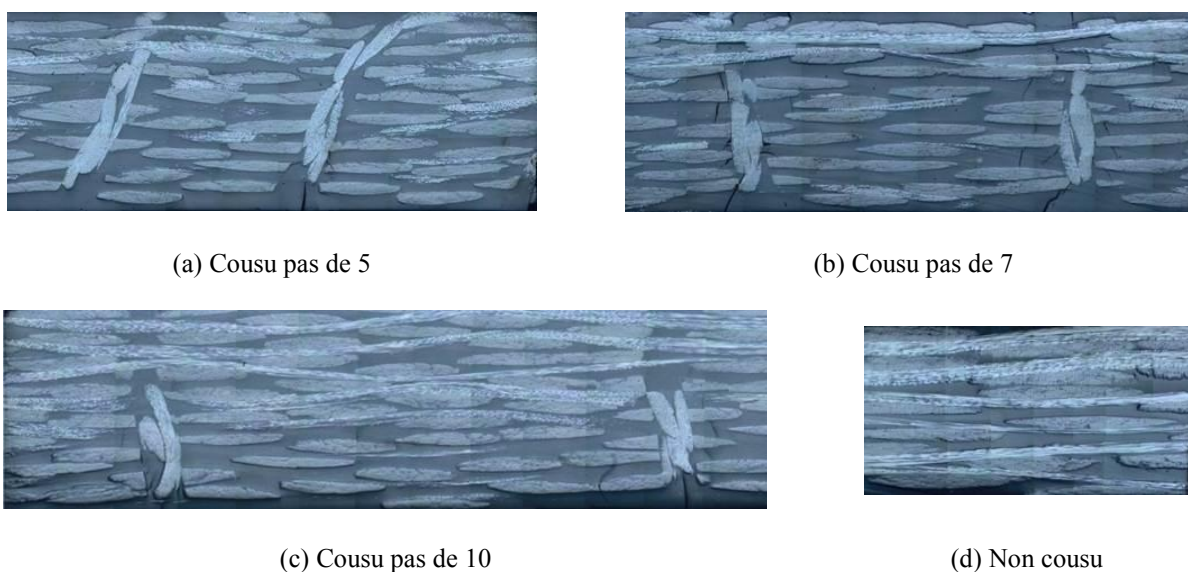


Figure 41 : Cartographie des échantillons de faible épaisseur.

### II.3.3.3 Analyse quantitative

La méthode seuil permet de quantifier le taux de "*porosité* & " surfactive des échantillons. Ceci est obtenu en divisant le nombre de pixels correspondant aux porosités par le nombre total de pixels de la surface de l'échantillon :

$$\text{Taux de porosité surfactive} = \frac{\text{Nbre pixels porosité}}{\text{Nbre pixels total}} \quad (\text{II-4})$$

Pour les matériaux cousus, nous avons défini des surfaces moyennes élémentaires représentatives. Celles-ci sont définies autour des coutures, en fonction des différents pas de couture, comme le montre la Figure 42 pour l'échantillon cousu en pas de 5.

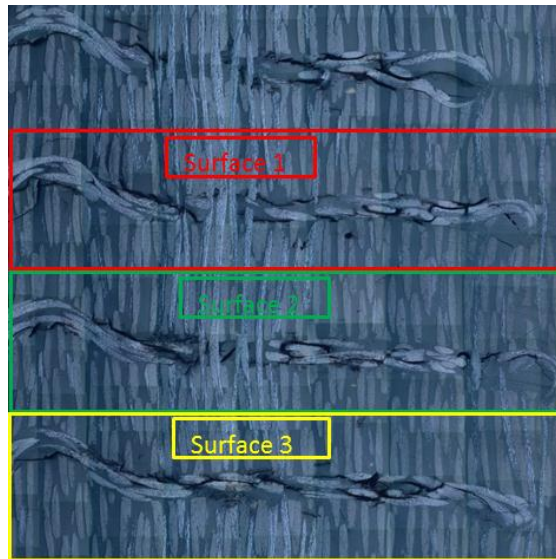


Figure 42 : Discretisation des surfaces d'observation sur échantillons cousus.

Cette démarche a été appliquée à tous les échantillons cartographiés. Par cette méthode nous obtenons les taux de porosités suivants :

Tableau 5 : Taux de porosité obtenus par analyse d'images.

Type de plaques cousues	V <sub>p</sub> (%) surfactive des plaques fines	V <sub>p</sub> (%) surfactive des plaques épaisses
Pas de 10	0.14 ± 21%	0.89 ± 14%
Pas de 7	0.30 ± 2%	1.70 ± 8%
Pas de 5	0.16 ± 23%	1.43 ± 8%

Comme préciser au début de ce paragraphe, l'extrapolation de ces résultats, pour atteindre des données volumiques (stéréologie), ne peut être réalisée qu'à travers une étude statistique en prenant les précautions nécessaires pour assurer que les surfaces analysées soient représentatives du volume. Pour cela, il faudrait multiplier les surfaces d'observation, en multipliant les plans de découpe des échantillons tels que des plans parallèles et perpendiculaires à la direction du flux d'imprégnation avec, également, des plans de coupe dans le voisinage proche des coutures.

Cependant, avec un nombre limité de surfaces analysées, nous obtenons des résultats dans les mêmes ordres de grandeur que ceux obtenus par densimétrie. Le Tableau 6 donne une comparaison de ces résultats pour les plaques épaisses.

Tableau 6 : Comparaison des taux de porosité obtenus par les deux méthodes.

Plaques épaisses cousues	$V_p$ (%) surfacique par analyse d'images	$V_p$ (%) volumique par analyse densimétrique
Pas de 5	$1.43 \pm 8\%$	$1.98 \pm 13 \%$
Pas de 7	$1.70 \pm 8\%$	$1.38 \pm 10 \%$
Pas de 10	$0.89 \pm 14\%$	$1.10 \pm 15 \%$

## II.4 Conclusion

Dans la méthode d'analyse d'image, le facteur humain a un fort impact sur les résultats obtenus puisque la valeur seuil est choisie visuellement par l'opérateur [100], [101]. D'autre part, en présence de fissures au sein du matériau, il est difficile de distinguer, par cette méthode, les pixels correspondant aux fissures de ceux des porosités. Ces deux entités étant de même nature, le contraste obtenu sur les images est identique. Dans une problématique similaire certains auteurs [99], [101], [102], procèdent à des opérations de filtrage systématiquement de l'image à partir d'un critère de taille minimale des porosités afin de distinguer les pixels de certaines fibres cassées, lors du polissage, de ceux des porosités proprement dites.

La plus importante information à retenir de ce paragraphe est que l'introduction de coutures dans un stratifié favorise l'apparition de fissures, au sein même des coutures ou dans un voisinage proche. Ces fissures, localisées dans des zones riches en résine, sont plus présentes pour les plaques épaisses. Ce phénomène peut être expliqué par deux facteurs conjugués : lors de son

passage à travers le renfort, l'aiguille crée des ouvertures qui seront comblées par la résine lors de la phase d'imprégnation. Ceci a pour conséquence la formation des zones riches en résine. Lors de la phase de réticulation, l'exothermie produite par la réaction de réticulation est plus forte dans ces zones. Il s'en suit des dilatations thermiques différentielles qui en phase de refroidissement et retrait provoquent la fissuration de la matrice ; processus constaté par certains auteurs sur des préformes renforcées dans l'épaisseur par la technique du Z-pinning [104], [105]. Le deuxième facteur peut être attribué à la perturbation de la perméabilité de la préforme, provoquée par la couture. En effet, comme le montre le chapitre III, la disposition du fil de couture provoque des gradients de perméabilités au sein de la préforme. Une des conséquences de ces gradients de perméabilité est que la vitesse du flux d'imprégnation est plus importante en surface qu'à cœur de la préforme. Au niveau des coutures, le flux se referme en surface, empêchant l'air, ou les gaz dégagés par la réaction de réticulation, de s'échapper ; favorisant ainsi la présence de porosités ou fissures.

Parallèlement à la présence des fissures, les observations micrographiques ont également révélé des défauts liés à la mise en œuvre des plaques. Les plus importants étant le désalignement des coutures (Figure 39) et la courbure (flambement) de celles-ci (Figure 40). Ces défauts sont inhérents au procédé de mise en œuvre. Ils se produisent lors du compactage de la préforme, en phase de fermeture du moule RTM. Le désalignement et la courbure des coutures, associés à la présence de fissures dans celles-ci auront très probablement des conséquences sur le comportement mécanique de telles structures. Ce point sera discuté dans le chapitre IV dédié au comportement mécanique des structures cousues.

## Chapitre III D étermination exp ériméntale de la perm éabilit é

### III.1 G énéralit és sur la mesure de perm éabilit é

Les renforts utilisés dans les structures composites sont essentiellement des architectures orthotropes. Dans le cas général 3D, le tenseur de perméabilité est caractérisé, par les composantes  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ , et  $K_{zz}$  [106]. Dans la pratique, cette dernière composante transversale  $K_{zz}$  est négligée pour les structures minces. Pour les préformes isotropes planes telles que les renforts de type Mat à fibres courtes ou continues (renforts utilisés pour la grande diffusion), le tenseur se réduit à une constante :  $K = K_{xx} = K_{yy}$ . De fait, on comprend que l'essentiel des études est focalisé sur les renforts orthotropes sous forme bidirectionnelle (2D).

Pour accéder à ce tenseur de perméabilité plane, de nombreux dispositifs ont été développés. Parmi ceux-ci se détachent deux méthodes remarquables. Il s'agit de la méthode à flux unidirectionnel sur échantillons rectangulaires et celle à flux radial sur échantillons de forme carrée. Ces deux méthodes ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients [40], [52], [107]. Il faut signaler que pour le cas 3D, lorsque l'on veut atteindre la perméabilité transverse, celle-ci est obtenue, séparément, en utilisant un dispositif spécifique qui vient en complément des deux autres méthodes.

Indépendamment de la méthode utilisée, les conditions opératoires sont aussi multiples, même si le fondement est toujours basé sur l'exploitation de la loi de Darcy. Dans certains travaux [56], [59] le fluide est injecté à pression constante, d'en d'autres [52], [58] il est injecté à débit constant. Certaines études [108], [109] considèrent la perméabilité insaturée en régime instable. Dans d'autres références, [107], [110] on s'intéressera plus à la perméabilité saturée en régime permanent. Concernant le fluide, pour des raisons évidentes de difficultés de mises en œuvre, les expérimentations sont toujours conduites avec un fluide inerte (au lieu d'une résine réactive telle que l'Epoxy ou la Polyester). Ce fluide inerte doit, de préférence, avoir une viscosité voisine du fluide réel.

Dans l'expression de la loi de Darcy, la perméabilité est considérée comme intrinsèque au milieu poreux et indépendant du fluide. En réalité, certaines études [56], [57] montrent que les effets capillaires jouaient un rôle important dans le mécanisme d'imprégnation. Ces effets capillaires

font intervenir les tensions de surfaces entre le fluide et la surface des fibres (notion de mouillabilité). En plus de la viscosité, la nature du fluide a donc une influence sur son écoulement à travers le milieu poreux.

Tous ces points justifient la disparité des résultats de perméabilités constatés au sein de la communauté scientifique. Dans une démarche de mise en place d'une normalisation, un premier Benchmark a été organisé par la communauté scientifique mondiale. Il portait sur des tissus de type sergé 2-2, l'un en carbone et l'autre en Verre. Aucune consigne particulière n'a été imposée (flux axial ou radial, régime saturé ou insaturé, nature du fluide, etc.). Seize différentes procédures ont été pratiquées. La synthèse de ce Benchmark [111], publiée en 2011, a révélé des écarts de plus d'une décade entre les résultats des différents partenaires. Suite à constat, un deuxième Benchmark a été lancé autour de 13 universitaires et 3 industriels dont Airbus Allemagne avec, cette fois-ci, des consignes strictes, identiques pour tous les partenaires : même renfort (Sergé 2-2 Carbone) pour un taux volumique en fibre autour de 45%, méthode du flux unidirectionnel, huile de Silicone comme fluide d'injection, injection à pression constante, régime insaturé. La synthèse de ce deuxième Benchmark a été publiée en 2014 [112]. Elle montre des écarts de l'ordre de 20 %. Ces résultats montrent que le dispositif expérimental et les conditions opératoires ont une grande influence sur les résultats obtenus. La méthode à flux radial sur échantillon carré (Figure 43), a l'avantage de donner un accès simultané aux perméabilités principales  $K_1$  et  $K_2$ . Cependant, les résultats sont influencés, entre autres, par la taille de la découpe opérée sur le renfort, au niveau du point d'injection du fluide [26], [40], [50], [51].

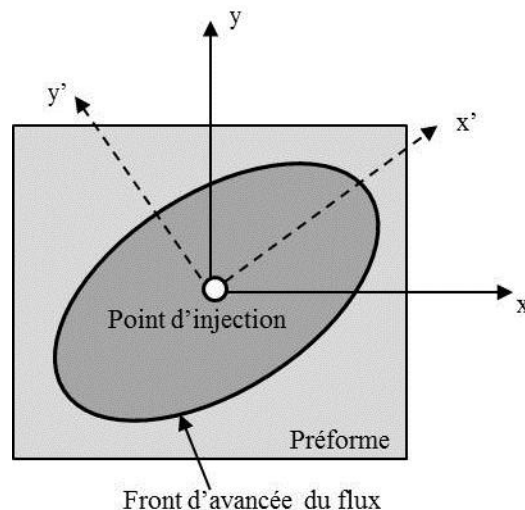


Figure 43 : Principe de la méthode d'injection à flux radial sur échantillon carré.



En 2011, notre laboratoire, grâce au financement de l'état et la région Picardie (Cf. chapitre II), s'est équipé d'un banc de mesure de perméabilité à flux unidirectionnel. Les résultats présentés dans ce chapitre sont donc basés sur cette méthode. Bien que fastidieuse, coûteuse et largement chronophage, cette méthode a la réputation d'aboutir à des résultats répétitifs, fiables, à condition de respecter certaines précautions. Nos conditions opératoires sont en grande conformité avec les recommandations citées dans le Benchmark II. Les grandes lignes de cette méthode à flux unidirectionnel sont décrites ci-dessous.

### III.2 Méthode à flux unidirectionnel

Dans un milieu poreux orthotrope 2D, pour une injection centrale (Figure 43), l'écoulement du fluide aura une forme elliptique (circulaire pour un milieu isotrope). Caractériser le tenseur de perméabilité plane revient à décrire l'évolution elliptique du front d'avancé du fluide. L'équation de cette ellipse pourra donc être déterminée par la connaissance de trois points du front elliptique du fluide. La méthode à flux unidirectionnel est basée sur ce principe : déterminer trois points de l'ellipse par des mesures unidirectionnelles. Dans la pratique [18], [113], on mesure les perméabilités dans les directions de la chaîne (axe  $x$  ou  $K^0$ ), de la trame (axe  $y$  ou  $K^{90}$ ) et une troisième direction fixée arbitrairement à  $45^\circ$  ( $K^{45}$ ). L'équation de l'ellipse est obtenue à partir de ces données, Figure 44.

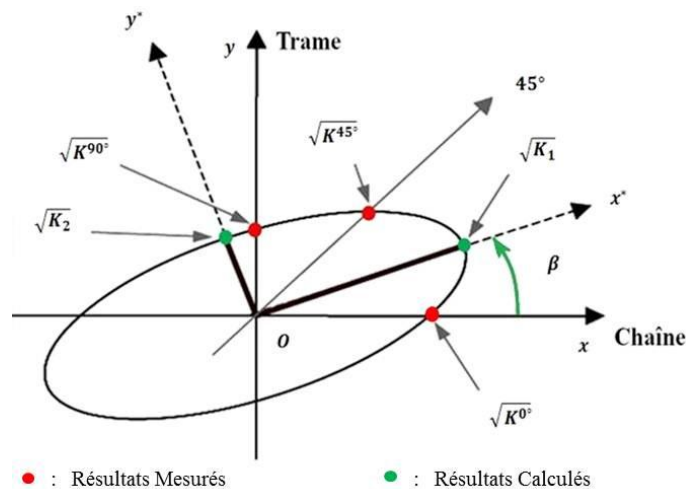


Figure 44 : Modèle elliptique des perméabilités principales.

Le tenseur de perméabilité plane ( $K_1$  et  $K_2$ , ainsi que  $\beta$ , l'angle entre les repères du matériau et de l'ellipse) est obtenu par une rotation dans le plan, équation (III-1).



$$\begin{bmatrix} K^{0^\circ} \cos^2 \beta & K^{0^\circ} \sin^2 \beta & 0 \\ \frac{K^{45^\circ}}{2} & \frac{K^{45^\circ}}{2} & \frac{K^{45^\circ}}{2} \sin 2\beta \\ K^{90^\circ} \sin^2 \beta & K^{90^\circ} \cos^2 \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{K_1} \\ \frac{1}{K_2} \\ \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III-1})$$

Dans cette expérimentation à flux unidirectionnel en régime insaturé, la loi de Darcy est réexprimée de la façon suivante :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{K}{\mu \emptyset} \frac{\Delta P(t)}{x(t)} \quad (\text{III-2})$$

Où  $x(t)$  représente la position du front d'avancée du flux, et  $\emptyset$  la porosité de la préforme. Celle-ci est obtenue à travers le taux volumique en fibre de la préforme TVf, ( $\emptyset = 1 - \text{TVf}$ ).

Le TVf théorique est obtenu par l'expression :

$$\text{TVf} = \frac{A_w N_L}{\rho_f e} \quad (\text{III-3})$$

$$\text{Où : } A_w = \frac{M_f}{L W N_L} \quad (\text{III-4})$$

Avec :

$A_w$  : la masse surfacique d'une couche de renfort ( $\text{g/m}^2$ ) ;  $M_f$  : Masse de toutes les couches de tissu utilisées (g) ;  $L$  : Longueur du tissu (m) ;  $W$  : Largeur du tissu (m) ;  $N_L$  : Nombre de couches de tissu ;  $\rho_f$  : Densité de tissu ( $\text{g/m}^3$ ) ;  $e$  : épaisseur de la pile de tissu = épaisseur de l'entrefer.

Le schéma de principe de cette méthode est donné par la Figure 45. Elle est utilisée aussi bien en régime insaturé qu'en régime saturé. Dans chaque cas, la perméabilité est mesurée par le contrôle du flux du fluide à travers le renfort. En régime insaturé, la perméabilité est mesurée à travers le suivi du front d'avancée du fluide. La détection du passage du fluide est réalisée soit par des capteurs de pression, disposés à espacements réguliers dans l'empreinte du moule, soit de manière visuelle ; auquel cas le moule doit disposer d'une face transparente rigide. En régime saturé, la perméabilité est obtenue par la mesure du débit et de la chute de pression entre deux points.

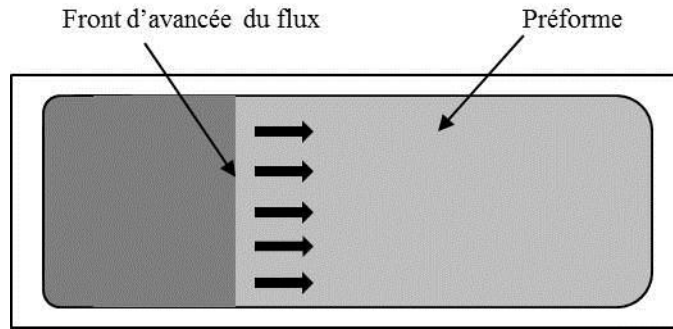


Figure 45 : Méthode du flux unidirectionnel sur échantillons rectangulaires.

### III.3 Dispositif expérimental

Le banc de mesure de perméabilité de notre laboratoire est représenté dans la Figure 46. Il est essentiellement constitué de quatre éléments:

- Un moule équipé d'un capteur de pression disposé juste avant le point d'injection.
- Un pot de compression pour l'injection du fluide à pression imposée. Ce pot de compression est relié au réseau d'air comprimé à travers un régulateur de pression.
- Une pompe hydraulique pour la manœuvre de la partie supérieure du moule.
- Une unité d'acquisition de données reliée à un ordinateur.

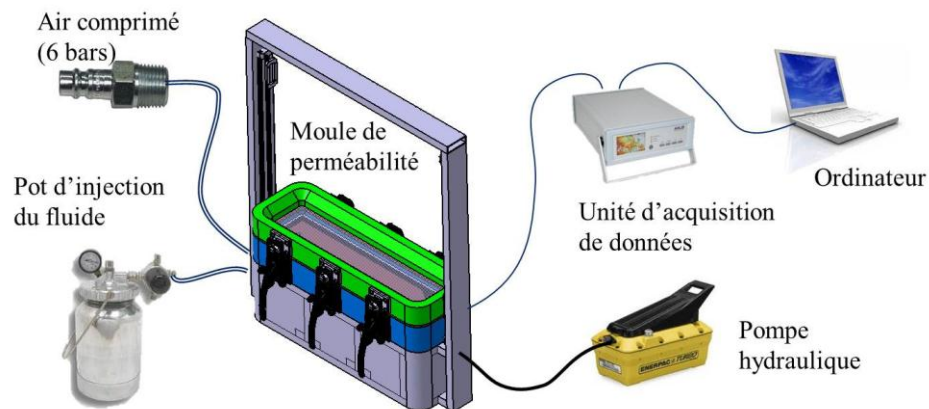


Figure 46 : Schéma de principe du dispositif expérimental de mesure de perméabilité.

La particularité de ce dispositif est que la partie inférieure du moule est mobile pour permettre des mesures pour différentes épaisseurs d'entrefer. La partie supérieure est en verre épais (20 mm

d'épaisseur), muni d'une grille de mesure permettant le suivi du front d'avancée du fluide (Figure 47). Le cadre intermédiaire constitue l'entrefer. Lors de la fermeture du moule, il sera pris en sandwich entre la partie basse, mobile, et la partie haute transparente. L'étanchéité du mécanisme est assurée par un joint plat en élastomère déposé entre l'entrefer et l'échantillon.

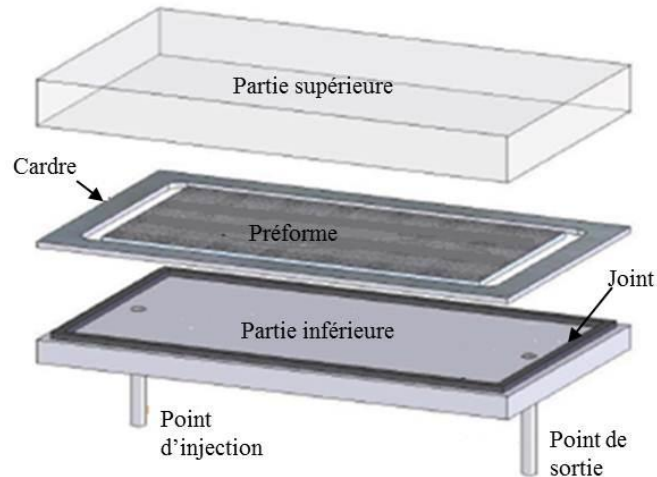


Figure 47: Détails des éléments constituant le moule.

### III.4 Protocole expérimental

Les principales étapes du protocole expérimental sont décrites ci-dessous.

#### III.4.1 Préparation des échantillons

Le moule est conçu pour des échantillons de 400 mm de long et 105 mm de large. Pour éviter les effets de bords le long du parcours du fluide, un cordon de gel silicone est déposé entre la préforme et le joint plat en élastomère (Figure 48). Les coupons de tissus sont donc découpés à des largeurs de 100 mm.

Lors de la découpe, une attention particulière est prise pour éviter la déformation du tissu et assurer la conservation de ses orientations. Cette découpe peut être faite avec une paire de ciseaux (découpe pli par pli), avec un cutter, sur un empilement en ayant assuré le maintien, où par découpe US, sur empilement, avec le robot.

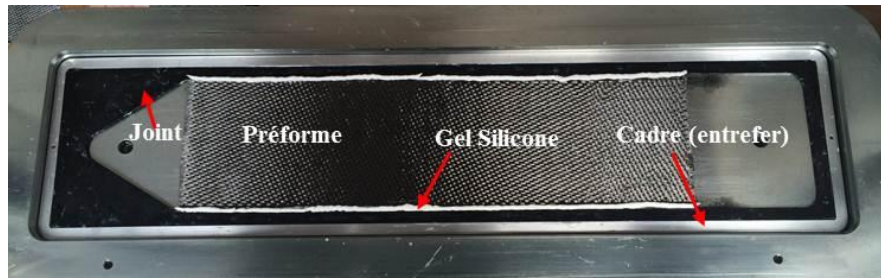


Figure 48 : Mise en place de l'échantillon dans l'empreinte du moule.

### III.4.2 Détermination du Taux Volumique en fibre

Pour une épaisseur d'entrefer donnée, le taux volumique en fibre est obtenu par la détermination la masse de la préforme (cf. équation III-3 et III-4). Celle-ci peut être déterminée de deux manières : soit par pesée directe de l'ensemble de l'empilement, soit par détermination de la masse surfacique du tissu.

Dans le premier cas, la pesée est faite systématiquement pour chaque échantillon. Cette opération nécessite l'usage d'une balance de précision à grand plateau pour recevoir les échantillons de  $400 \times 100 \text{ mm}^2$ . Cette méthode de pesée est plus rigoureuse (pesée systématique), elle tient compte, à une échelle macroscopique, des défauts de fabrication des tissus. Cependant, la manipulation des échantillons peut être une source d'erreur à cause des chutes des torons périphériques des coupons de tissu.

Dans le deuxième cas, la masse surfacique du tissu est obtenue par la moyenne de 5 mesures sur des coupons de  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ . Elle est faite une seule fois (moins de manipulation de tissus), sur une balance de précision de laboratoire. Pour tenir compte des éventuels défauts de fabrication, les échantillons sont prélevés de façon aléatoire (Figure 49).

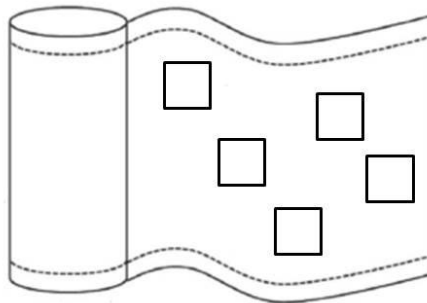


Figure 49 : Prélèvement des coupons de  $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ .

La perméabilité est directement influencée par le taux volumique en fibres. Par souci de rigueur et de réduction des sources de dispersion des résultats, pour le calcul du TVf, nous avons évalué les deux méthodes de pesée. Cette démarche a été faite sur un tissu carbone en satin de 5, lors d'une campagne d'essais croisés avec SAFRAN Composites. L'écart maximal constaté sur les TVf n'excède pas 1.44 %. La répercussion sur les valeurs de perméabilités obtenues est de 0.6 % aussi bien pour le sens chaîne et le sens trame. D'après ces résultats, ces deux méthodes sont équivalentes.

**Remarque :**

Dans notre étude, les deux méthodes peuvent être appliquées aux préformes non cousues. Par contre, pour les préformes cousues, la pesée sur échantillons complets est obligatoire étant donné qu'ils sont prélevés (découpe US) à partir d'une grande surface d'empilement préalablement cousue.

### **III.4.3 Fluide d'imprégnation**

Pour être au plus près des conditions d'imprégnation d'une structure composite, idéalement, le fluide de mesure de la perméabilité devrait être de même nature que celui pour imprégner le composite : une résine réactive. Cependant, injecter une résine dans le moule de perméabilité implique de grosses complications opératoires. La plus contraignante étant l'adhésion de la résine aux parois du moule, avec nécessité d'un nettoyage aux solvants à chaque expérimentation.

Pour cela, les expérimentations sont menées avec des fluides newtoniens, inertes ayant des viscosités voisines de celles du fluide réel. Différentes natures de fluide sont utilisées dans les laboratoires : le sirop de maïs, l'huile végétale, l'huile de silicone, l'huile de lubrification des moteurs thermiques.

Nos premières expérimentations ont été réalisées avec de l'huile de Colza, économique et facilement disponible, avec l'inconvénient d'être instable (oxydation dans le temps), avec une viscosité irrégulière, étant d'origine végétale et destinée à la consommation grand public. Par la suite, elle a été remplacée par une huile de silicone calibrée (PMX-200 50 cst), distribuée par XIAMETER, réellement inerte et beaucoup plus stable dans le temps.

Tous les résultats présents dans cette étude ont été obtenus avec l'huile de Silicone comme fluide d'imprégnation. La viscosité de cette huile a été évaluée avant chaque campagne d'essai. Les mesures de viscosité, en fonction de la température, ont été faites sur un rhéomètre (Anton Paar MCR 502). Les expériences ont été effectuées dans un local à température contrôlée où la température moyenne était de  $22^{\circ}\text{C} \pm 1$  à  $2^{\circ}\text{C}$ .

#### III.4.4 Acquisition et exploitation des données

Les données des expériences sont traitées par le logiciel PermLab, développé par l'École Polytechnique de Montréal. Il exploite la loi de Darcy exprimée par l'équation (II-2). Après fermeture du moule, on règle la pression d'injection du fluide puis on ouvre la vanne d'injection. La vitesse d'avancée du fluide est détectée visuellement. L'opérateur dispose d'un pointeur numérique est consigne le temps de passage du fluide à chaque graduation de la face supérieure du moule (Figure 50).



Figure 50 : Détection du Front d'avancée du flux.

À chaque impulsion, on enregistre le temps de passage du front ainsi que la pression d'injection instantanée. Ceci pour tenir compte des éventuelles fluctuations de la pression d'injection durant l'expérience. Dans le calcul du tenseur de perméabilité plane ( $K_1$ ,  $K_2$  et  $\beta$ ), le logiciel propose trois différentes approches. Celles-ci sont développées dans la référence [18].

### III.5 Résultats

Comme décrits précédemment, les tests ont été réalisés suivant les trois orientations :  $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  et  $45^{\circ}$ . Pour chaque orientation, au moins trois échantillons ont été testés.

**III.5.1 Préformes non cousues**

Pour les préformes non cousues, nous avons utilisé la plus forte épaisseur d'entrefer disponible sur le banc de mesure, soit 3.76 mm. Les échantillons sont constitués de 8 couches de tissus carbone (cf. chapitre II). Les résultats sont présentés dans le Tableau 7.

Tableau 7: Résultats des perméabilités mesurées sur préformes non cousus.

Tissu Carbone, satin de 5, <b>non cousu</b>					
Chaîne		Trame		45°	
TVf (%)	$K^0$ ( $10^{-11} \text{m}^2$ )	TVf (%)	$K^{90}$ ( $10^{-11} \text{m}^2$ )	TVf (%)	$K^{45}$ ( $10^{-11} \text{m}^2$ )
44,07	8.47	43.82	19.62	43.81	10.76
44,03	7.41	44.04	16.98	43.90	11.86
43,96	9.73	44.09	19.31	44.05	10.21
44,05	8.37	44.02	16.14	44.04	12.02
43.97	8.36	/	/	/	/
Moyenne	$8.47 \pm 9.8\%$	$18.01 \pm 9.5\%$		$11.21 \pm 7.8\%$	

On constate que la perméabilité en sens trame est deux fois supérieure à celle de la chaîne. Ceci s'explique par l'architecture propre au satin de 5, les ondulations entre chaîne et trame étant fortement déséquilibrées. À partir de ces résultats on peut déterminer le tenseur de perméabilité plane (Figure 51).  $K_1 = 18.04 \times 10^{-11} \text{m}^2$ ,  $K_2 = 8.46 \times 10^{-11} \text{m}^2$  et  $\beta = 92.2$ . L'angle  $\beta$  étant voisin de  $90^\circ$ , on retrouve que la direction principale  $K_1$  est confondue avec le sens trame, alors de  $K_2$ , l'est avec le sens chaîne. Le rapport d'anisotropie  $K_1/K_2 = 2.13$ , est identique à celui entre chaîne et trame.

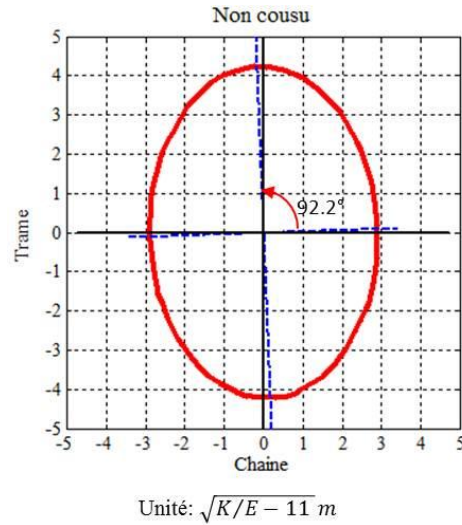


Figure 51 : Tenseur de perméabilité plane de la préforme non cousue.

### III.5.2 Préformes cousues

Les préformes cousues ont été réalisées et testées dans des conditions identiques aux non cousus, c'est-à-dire, 8 couches de tissu dans un entrefer de 3.76 mm. Bien évidemment, dans ces conditions, la couture augmentera le TVf final de la préforme.

Dans un premier temps, dans le but d'aborder l'influence des coutures, l'analyse présentée ci-dessous sera faite en conformité avec le principe exposé dans le chapitre II, paragraphe II.3.1. C'est-à-dire, évaluer l'apport des coutures sur un empilement de tissus 2D, les structures cousues ayant le même nombre de plis. Les résultats des perméabilités mesurées pour les trois densités de coutures sont présentés dans les Tableau 8, Tableau 9 et Tableau 10.

Tableau 8: Perméabilités mesurées pour les préformes cousues en pas de 5 mm.

Tissu Carbone, satin de 5 <b>cousu en pas de 5</b>					
Chaine		Trame		45°	
TVf (%)	$K^0 (10^{-11} \text{m}^2)$	TVf (%)	$K^{90} (10^{-11} \text{m}^2)$	TVf (%)	$K^{45} (10^{-11} \text{m}^2)$
46.18	7.29	46.08	11.18	46.18	8.32
46.17	7.48	46.17	11.16	46.33	8.3
46.15	8.04	46.31	10.99	46.27	7.9
/	/	/	/	46.21	7.81
Moyenne	$7.60 \pm 5.1 \%$	$11.11 \pm 0.9 \%$		$8.08 \pm 3.3 \%$	



Tableau 9: Perméabilités mesurées pour les préformes cousues en pas de 7 mm.

Tissu Carbone, satin de 5 <b>cousu en pas de 7</b>					
Chaîne		Trame		45°	
TVf (%)	$K^0 (10^{-11} \text{m}^2)$	TVf (%)	$K^{90} (10^{-11} \text{m}^2)$	TVf (%)	$K^{45} (10^{-11} \text{m}^2)$
45.53	7.96	45.31	11.44	45.36	10.25
45.76	8.98	45.41	11.42	45.47	9.81
45.46	8.6	45.4	12.11	45.68	10.3
45.36	7.61	45.45	12.1	45.51	9.02
Moyenne	$8.29 \pm 7.4 \%$	$11.77 \pm 3.3 \%$		$9.85 \pm 6 \%$	

Tableau 10: Perméabilités mesurées pour les préformes cousues en pas de 10 mm.

Tissu Carbone, satin de 5 <b>cousu en pas de 10</b>					
Chaîne		Trame		45°	
TVf (%)	$K^0 (10^{-11} \text{m}^2)$	TVf (%)	$K^{90} (10^{-11} \text{m}^2)$	TVf (%)	$K^{45} (10^{-11} \text{m}^2)$
44.97	9.43	44.69	12.59	44.63	10.00
44.95	8.51	44.53	12.86	44.84	9.95
44.71	7.76	44.95	12.53	44.95	9.93
44.95	9.28	44.74	12.58	/	/
44.86	9.73	44.89	10.97	/	/
Moyenne	$8.94 \pm 8.9 \%$	$12.31 \pm 6.2 \%$		$9.96 \pm 0.4 \%$	

### III.5.3 Comparaison sur les perméabilités mesurées

Une première analyse de l'influence de la couture peut être abordée à partir de ces données. Par soucis de clarification, l'analyse porte, en premier lieu, uniquement, sur les sens chaîne et trame. Le Tableau 11, synthétise ces données.

Tableau 11: Synthèse des données pour les sens chaîne et trame.

	TVf moyen (%)	$K^0$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> )		$K^{90}$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> )	
Non cousu	43.99 ± 0.2 %	8.47	référence	18.01	référence
Pas de 10	44.79 ± 0.34%	8.94	+ <b>5.26 %</b>	12.31	- <b>31.65 %</b>
Pas de 7	45.48 ± 0.29%	8.29	- <b>2.13 %</b>	11.77	- <b>34.65 %</b>
Pas de 5	46.21 ± 0.17 %	7.60	- <b>10.27 %</b>	11.11	- <b>38.31 %</b>

L'influence des coutures est beaucoup plus marquée dans le sens trame, direction où la perméabilité du tissu de base est la plus forte. On constate que pour la densité de couture la plus faible (pas de 10), la perméabilité  $K^{90}$  est dégradée de 32 %. Cette dégradation s'accroît au fur et à mesure que la densité de couture augmente : plus de 34 % pour le pas de 7 et environ 40 % pour le pas de 5. Dans le sens chaîne, on constate une légère (+ 5 %) amélioration de la perméabilité  $K^0$  pour la plus faible densité de couture (pas de 10). Ensuite, la perméabilité est dégradée au fur et à mesure de l'augmentation de la densité de couture : - 2% pour le pas de 7 et - 10 % pour le pas de 5.

L'influence de la couture sur les perméabilités en sens chaîne et trame peut s'expliquer par sa disposition au sein de l'armature.

En sens trame, la totalité de la couture est disposée perpendiculairement au sens d'écoulement du fluide. Elle s'oppose au déplacement du fluide et dégrade donc la perméabilité. L'augmentation de la densité de couture augmentera les obstacles au passage du fluide et accentuera la dégradation de la perméabilité.

En sens chaîne, une partie de la couture (partie supérieure de la couture) est dans le sens de l'écoulement alors que le reste (épaisseur et bouclettes en face inférieure) est en opposition à l'écoulement du fluide. Il y a compétition en ces deux phénomènes. Suivant la proportion de l'un ou l'autre, l'effet global sera une amélioration ou une dégradation.

Pour le pas de 10, par exemple (faible densité), pour un seul pas de couture (Figure 52), on aura 10 mm de fil de couture en surface (effet favorable), contre 3.76 mm en épaisseur plus environ 2

mm de bouclettes en face inférieure (effet défavorable). Le résultat final sera une légère amélioration de la perméabilité (+ 5 %). Le même raisonnement peut être tenu pour les deux densités de coutures suivantes. Dans le cas du pas de 7, les effets d'opposition l'emportent légèrement sur les effets favorables, d'où une dégradation globale de -2%. Dans le cas du pas de 5, les proportions de fils de couture parallèle au flux et en opposition sont à peu près équivalentes (5 mm contre 3.76mm + bouclettes). Ceci a pour conséquence une dégradation significative (-10 %) de la perméabilité en sens chaîne.

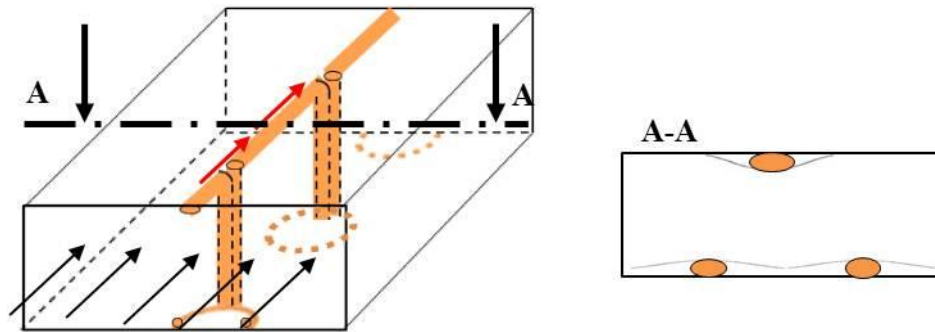


Figure 52 : Schéma de positionnement des coutures par rapport au flux.

Ceci nous amène à penser que la portion de fil de couture à l'intérieure de la préforme a des effets (néfastes) plus conséquents que ceux (bénéfiques ou maléfiques) produits par la portion de fil en surface. En d'autres termes, la couture provoque des perméabilités locales, variables en fonction de sa position dans la préforme. Ce phénomène a été mis en évidence pour la couture de type OSS. Cette étude complémentaire est présentée à la fin de ce chapitre. Par extrapolation, pour une épaisseur de préforme donnée, les très faibles densités de couture (20 ou 30 mm et plus) amélioreront la perméabilité en sens chaîne. Cet effet d'amélioration sera d'autant plus amoindri que les préformes seront épaisses.

Ce paragraphe a décrit l'influence des coutures, séparément, dans le sens chaîne et celui de la trame. L'influence de ces coutures sur le comportement global de la préforme vis-à-vis de l'écoulement du fluide peut être vue à travers le tenseur de perméabilité plane (perméabilités principales).

### III.5.4 Conséquences sur le tenseur de perméabilité

Les perméabilités mesurées dans les directions de la chaîne  $K^0$ , de la trame  $K^{90}$  et à  $45^\circ$  ( $K^{45}$ ) permettent de calculer les éléments du tenseur de perméabilité plane des préformes testées (cousues et non cousues). Ces résultats sont rassemblés dans le Tableau 12.

Tableau 12: Comparaison des perméabilités principales.

	$K_1$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> )	$K_2$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> )	$\beta$ (°)	$K_1/K_2$
Non cousu	18.04	8.46	92.2	<b>2.13</b>
Pas de 5	11.59	7.39	106	<b>1.57</b>
Pas de 7	11.78	8.29	88.1	<b>1.42</b>
Pas de 10	12.38	8.9	97.1	<b>1.39</b>

L'anisotropie d'un renfort, du point de vue de la perméabilité, est caractérisée par le rapport des deux perméabilités principales  $K_1/K_2$ , appelé, justement, rapport d'anisotropie. D'après les résultats du Tableau 12, on constate que les coutures ont un effet atténuant sur l'anisotropie du matériau de base. Cet effet atténuant est plus marqué pour la faible densité de couture, étant donné que dans ce cas, il y a eu dégradation dans le sens trame et amélioration dans le sens chaîne (cf. Tableau 11). Cette analyse est illustrée par la représentation des ellipses d'écoulement du fluide pour les quatre matériaux, Figure 53.

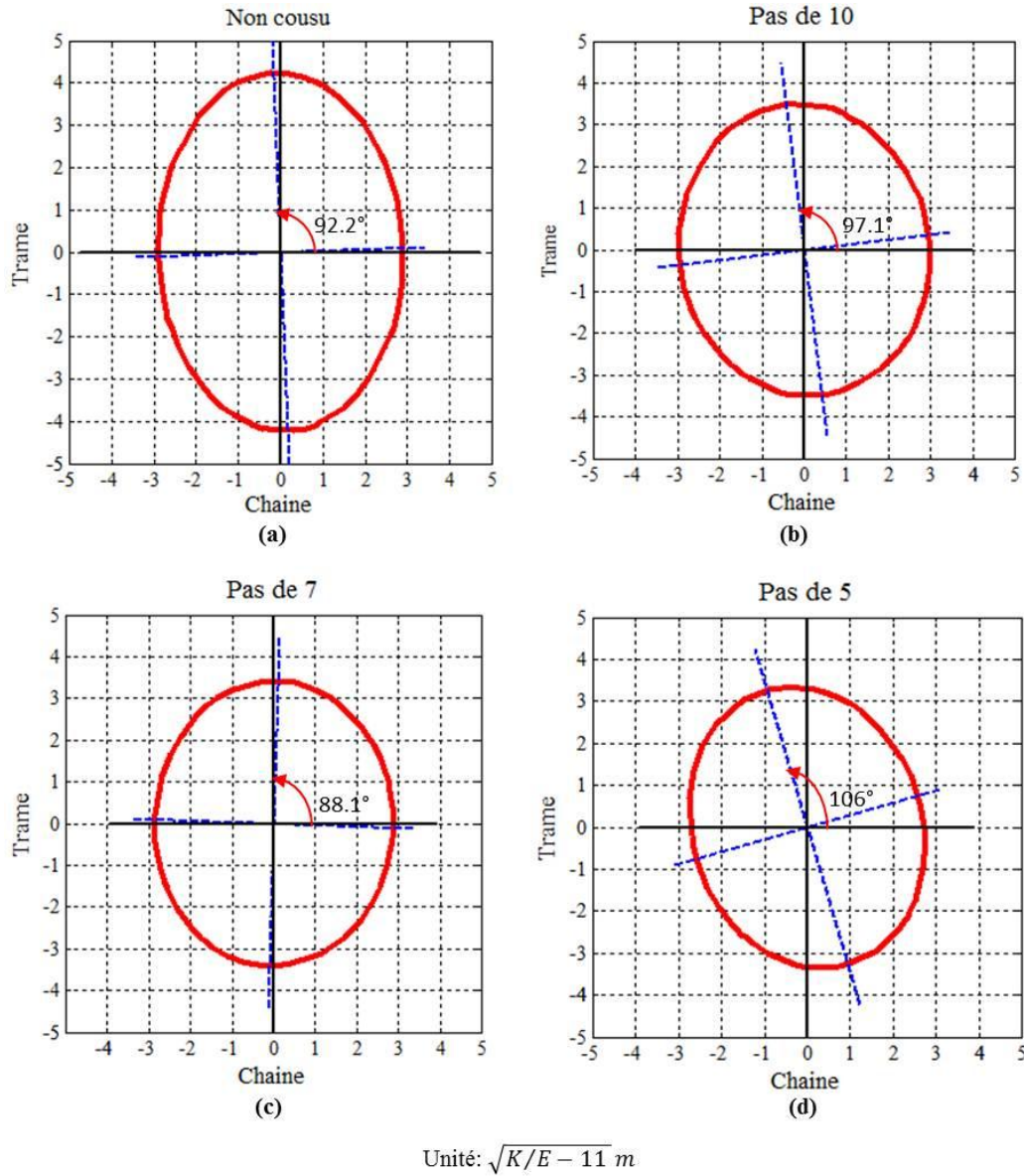


Figure 53: Tenseur de perméabilités principales des quatre matériaux.

### III.5.5 Prise en compte du TVf des coutures

Pour un renfort donné, la perméabilité est très fortement conditionnée par le TVf de ce renfort. De ce fait, une valeur de perméabilité donnée doit toujours être associée au TVf du renfort. Par conséquent, en toute logique, la comparaison des perméabilités de deux renforts fibreux doit se faire pour le même TVf.

L'introduction des coutures dans un empilement donnée conduit à une augmentation du TVf initial. Ceci induit une réduction de la perméabilité. Pour s'affranchir de cet effet d'augmentation

du TVf dû aux coutures, il serait intéressant de tenter l'exercice de comparer des préformes cousues et non cousues ayant des TVf égaux. Cette démarche peut être entreprise à travers le modèle de Kozeny-Carmen [18], présenté au chapitre I.

Pour un TVf donné, le modèle de Kozeny-Carmen permet de faire des corrections de perméabilités pour des TVf proches de la valeur initiale. D'après Demaria et al. [17], ce modèle est très acceptable dans une gamme de variation de TVf inférieure à 14% (cf.chapitre I). Ce modèle exprime la perméabilité en fonction de la fraction volumique en fibres :

$$K = \frac{r^2 (1-TV_f)^3}{c TV_f^2} \quad (\text{III-5})$$

Où  $r$  est le rayon des fibres et  $c$  la constante de Kozeny.

À partir d'un TVf connu associé à sa perméabilité  $K$ , on peut calculer la perméabilité d'un TVf<sub>cible</sub> en faisant le rapport  $K_{cible} / K$ . Le rapport des deux élimine l'inconnue ( $r^2/c$ ).

$$K_{cible} = \frac{r^2 (1-TV_{f\_cible})^3}{c TV_{f\_cible}^2} \quad (\text{III-6})$$

On a donc:

$$\frac{K_{cible}}{K} = \frac{(1-TV_{f\_cible})^3}{TV_{f\_cible}^2} \cdot \frac{TV_f^2}{(1-TV_f)^3} \quad (\text{III-7})$$

$$K_{cible} = K \cdot \frac{(1-TV_{f\_cible})^3}{TV_{f\_cible}^2} \cdot \frac{TV_f^2}{(1-TV_f)^3} \quad (\text{III-8})$$

D'après le Tableau 11, on peut établir le pourcentage de TVf propre aux coutures (Tableau 13).

Tableau 13: Pourcentage du TVf propre aux coutures.

	TVf total (%)	% TVf coutures
Non cousu	43.99	0
Pas de 10	44.79	1.78
Pas de 7	45.48	3.28
Pas de 5	46.21	5.05

Dans la démarche proposée, on fixe une valeur de  $TVf_{cible}$  commune aux quatre préformes, de 45 %. Cette valeur est centrée autour des valeurs initiales. Ainsi la correction visée du TVf sera inférieure à 3 %, valeur très largement inférieure à la limite de validité du modèle de Kozeny-Carmen. La correction des perméabilités pour un TVf de 45 % est présentée dans le Tableau 14.

Tableau 14: Perméabilités mesurées, corrigées pour un TVf unique de 45 %.

	$K^0 (10^{-11} \text{ m}^2)$		$K^{90} (10^{-11} \text{ m}^2)$	
Non cousu	7.68	référence	16.30	Reference
Pas de 10	8.79	+ <b>14.45 %</b>	12.01	- <b>26.32 %</b>
Pas de 7	8.74	+ <b>13.8%</b>	12.23	- <b>24.97 %</b>
Pas de 5	8.53	+ <b>11.07%</b>	12.49	- <b>23.37 %</b>

En premier lieu, si l'on compare ces résultats avec ceux du Tableau 11 (avant correction), on relève la très grande sensibilité de la perméabilité par rapport au TVf. A titre d'exemple, pour le pas de 5 mm, une correction de l'ordre de 2.6 % du TVf provoque une variation de la perméabilité supérieure à 12 %.

Au delà de ce constat, ces résultats mettent en exergue l'analyse décrite précédemment sur l'effet de la position du fil de couture par rapport au flux. En sens chaîne, lorsque le fil de surface (parallèle au flux) est dominant, la perméabilité est améliorée. Cette amélioration se réduit au fur et à mesure qu'entre en compétition les portions de fil en opposition au flux. En sens trame, toutes les portions de fil sont en opposition au passage du flux. Il y a systématiquement dégradation de la perméabilité.

### III.6 Effets des coutures de type OSS sur un renfort cousu

La couture de type OSS (cf. chapitre I) est une couture fermée réalisée à partir d'un seul fil. Ce procédé de couture conduit à un agencement très particulier du fil de couture (Figure 54).

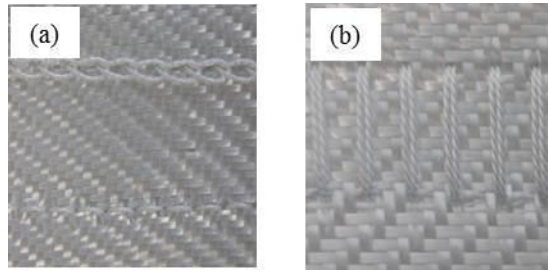


Figure 54: Couture de type OSS, présentation du fil de couture : (a) en face supérieure ; (b) en face inférieure

Pour ce type de couture, l'étude a porté sur un tissu sergé 2-2 en fibre de Verre, d'une masse surfacique de 270 g/m<sup>2</sup>. La préforme cousue est constituée de 20 couches de tissu. Elle est réalisée en disposant les ranges de couture parallèlement au sens chaîne du tissu de base. L'espacement des ranges de couture est de 25 mm et le pas de couture est de 5 mm. À partir de la préforme cousue nous avons prélevé des échantillons suivant les directions : 0°, 90° et 45°. La Figure 55 donne un aperçu de ces échantillons.

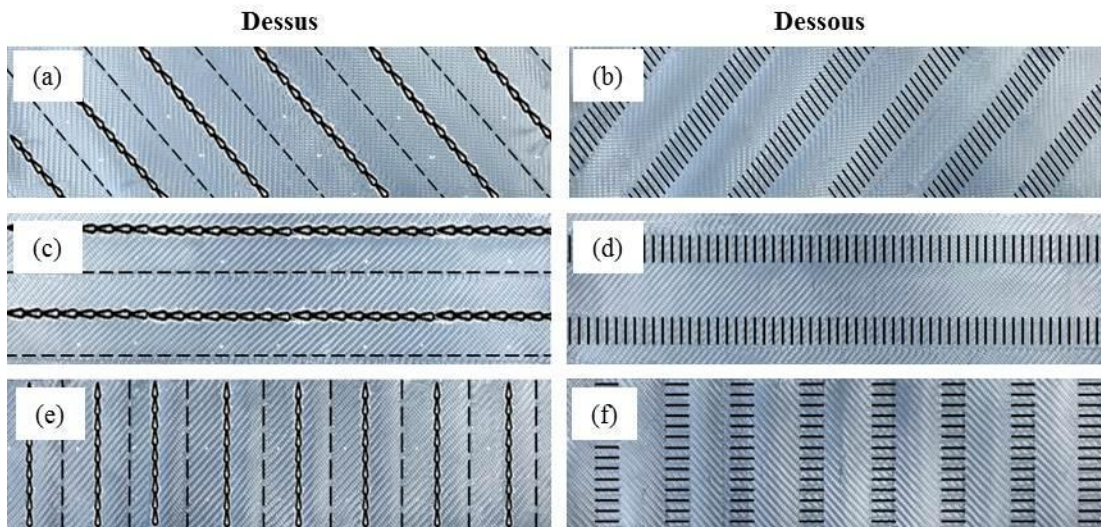


Figure 55: Echantillons du renfort cousus, (a) et (b) 45° ; (c) et (d) 0° ; (e) et (f) 90°.

Cinq échantillons ont été testés pour chacun direction. Les valeurs des perméabilités mesurées (Tableau 15), montrent que, macroscopiquement, la couture OSS ne perturbe que très légèrement la perméabilité du renfort de base:



Tableau 15: Perméabilités mesurées pour le sergé de verre cousu en OSS.

	$V_f$ (%)	$K^{0^\circ}$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> )	$K^{45^\circ}$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> )	$K^{90^\circ}$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> )
Sergé non cousu	42.22	$7.65 \pm 2 \%$	$4.82 \pm 7 \%$	$4.13 \pm 4\%$
Sergé Cousu	45.19	$6.89 \pm 17\%$	$5.12 \pm 7 \%$	$3.16 \pm 7 \%$

Cependant, à l'échelle mésoscopique, on constate que le flux est significativement perturbé au niveau des coutures. Ce phénomène est plus marqué pour le matériau cousu testé en sens chaîne ( $0^\circ$ ). Comme le montre la Figure 56, le flux, en début d'expérimentation, est très fortement perturbé et semble se stabiliser vers la fin de l'écoulement.


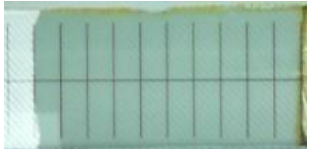

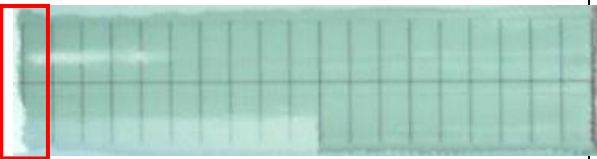


$0^\circ$	Fin	Milieu	Début
renfort non cousu			
renfort cousu sens chaîne			

Figure 56: Fronts d'écoulements des échantillons, cousus en OSS, à  $0^\circ$ .

Dans le sens  $90^\circ$ , ce phénomène n'est pas constaté, l'écoulement est uniforme pour les deux matériaux, Figure 57.

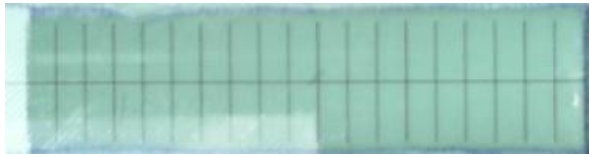


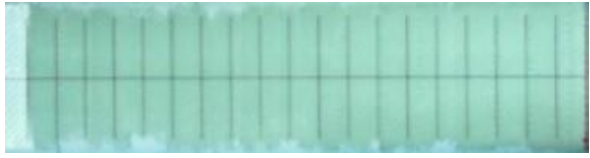
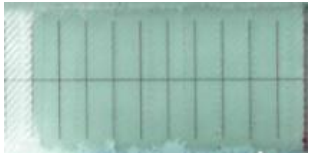

90°	Fin	Milieu	Début
renfort non cousu			
renfort cousu			

Figure 57: Front d'écoulement des échantillons à 90°.

Dans la direction à 45°, on constate un flux légèrement perturbé, avec une inclinaison proche de 45°, aussi bien pour le matériau cousu que celui non cousu, Figure 58.







45°	Fin	Milieu	Début
Renfort non cousu			
Renfort cousu			

Figure 58: Front d'écoulement des échantillons à 45°.

Cette perturbation du flux est due à des perméabilités locales directement associées à la disposition du fil de couture. La Figure 59, représente les gradients de perméabilités en vis-à-vis avec la disposition du fil de couture dans la préforme. On y voit clairement que les pics de forte perméabilité correspondent aux nœuds de surface (en noir sur la figure). Alors que les zones, en retrait, à faible perméabilité correspondent à l'espace où il y a forte concentration de fil en opposition au flux (en rouge sur la figure). La zone intermédiaire (en jaune sur la figure) correspond à l'espace dépourvu de couture (espacement entre deux rangs de couture).

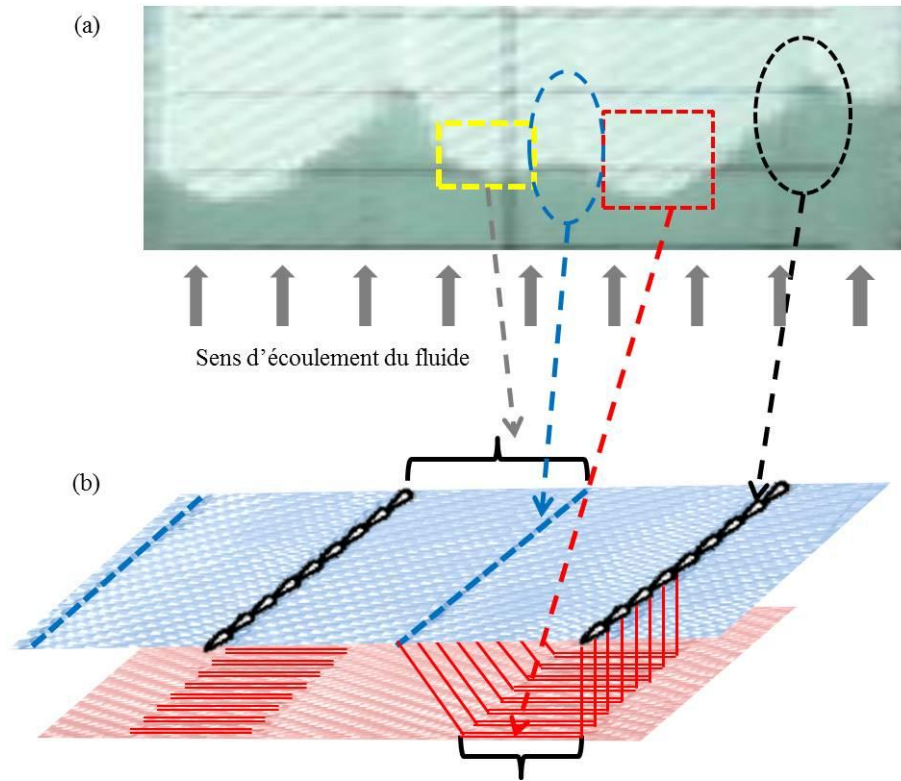


Figure 59: (a) Front d'avancée du fluide ; (b) Disposition de la couture.

En terme d'agencement du fil de couture, la couture OSS est l'une des plus compliquées (avec celle dénommée "blind stitching"). Cette étude complémentaire montre que pour de telles technologies de couture, la disposition du fil induit des gradients de perméabilité capables de provoquer d'importantes perturbations dans l'écoulement du fluide d'imprégnation.

### III.7 Conclusion

Il ressort de ce chapitre que, lorsque l'influence des coutures sur la perméabilité des préformes classiques 2D est abordée de façon globale, le constat le plus marquant réside dans un effet atténuateur du tenseur d'anisotropie plane. Ce résultat a été constaté par certains auteurs, notamment sur des renforts type NCF.

Dans le cas de nos travaux, à travers la variation du pas de couture et une analyse qui tient compte du TVf propre aux coutures, nous avons pu discerner les effets, sur la perméabilité, de la disposition spatiale de la couture.

Les résultats obtenus apportent un éclaircissement quant à l'interprétation des résultats de la littérature. En ce sens que l'amélioration ou la dégradation de la perméabilité sont des conséquences directes de la portion et disposition du fil de couture par rapport à la direction d'écoulement du fluide d'imprégnation.

La perméabilité apparente, macroscopique, est en réalité la résultante de gradients de perméabilités locaux, plus prononcés entre la surface et le cœur de la préforme. Ces gradients de perméabilité sont induits par des gradients de porosité (ou de TVf, selon le point de vue), liés à la disposition du fil de couture :

- Dans l'épaisseur de la préforme, le fil de couture se présente comme un renfort additionnel qui réduit, localement, le taux de porosité initial (réduction des espaces ouverts). Il se comporte donc comme une résistance additionnelle à l'écoulement du fluide, quelle que soit la direction de ce dernier.
- En surface, avant fermeture du moule, le fil de surface émerge de la préforme, il peut être considéré comme continu le long du rang de couture. Après fermeture du moule et compactage, il y a formation d'un pore ouvert (augmentation des espaces ouverts), autour du fil de surface, le long de la génératrice du rang de couture (cf. Figure 52). L'écoulement du fluide sera donc très favorisé le long de cette génératrice.

## Chapitre IV Effet de l'introduction des coutures sur le comportement mécanique

Ce chapitre vise à quantifier les effets de l'introduction des coutures sur les caractéristiques mécaniques globales d'un stratifié classique 2D renforcé par des coutures de type Tufting. L'appréciation de l'influence de ces coutures sera faite par la caractérisation mécanique de la matrice de rigidité 3D ainsi que certaines c

aractéristiques à la rupture. Ceci pour des structures cousues en comparaison à celle du stratifié classique 2D non cousu. Le Tableau 16 résume les caractéristiques mécaniques visées ainsi que les tests mécaniques correspondants.

Tableau 16: Synthèse des caractéristiques mécaniques visées.

Caract éristiques vis ées	Test correspondant
$E_1, E_2$ et $\nu_{12}$ ; $X^+$ et $Y^+$ : respectivement, contrainte à la rupture en traction sens 1 et sens 2.	Traction uniaxiale
$G_{12}$ et $\tau_{12\text{ultime}}$	Traction sur stratifié orienté à $45^\circ$ .
$E_3$ et $Z^-$ : contrainte à la rupture en compression dans le sens 3.	Compression sur cubes
$G_{13}, G_{23}, \tau_{13\text{ ultime}}$ et $\tau_{23\text{ ultime}}$	Flexion 3 points en poutre courte

### IV.1 Instrumentations

Les déformations sont habituellement obtenues soit par des extensomètres ou par des jauges de déformations. Ces deux types d'instruments sont, dans la plupart des cas, suffisamment précis et efficaces. Cependant, la jauge de déformation a l'inconvénient de ne donner accès qu'à une information ponctuelle. L'extensomètre, quant à lui, donne une information moyennée sur une zone restreinte.

La **CIN** (Corrélation d'Image Numérique) ou, en anglais, **DIC** (**D**igital **I**mage **C**orrelation) est en perpétuel développement depuis plus d'une décennie. Elle se démocratise de plus en plus et tend à devenir une instrumentation commune (du moins au sein des laboratoires universitaires). L'avantage indéniable de cette technique est qu'elle donne accès à des champs de déplacements bidirectionnels (et même tridimensionnelle pour le cas de la stéréocorrélation). Cet atout majeur permet d'utiliser cette technique bien au-delà de la simple mesure de déformation.

Concernant notre étude, il est évident que la présence des coutures va perturber, localement, le comportement de ces structures avec des conséquences, à l'échelle macroscopique, sur le comportement global. L'appréciation du comportement devra donc se faire avec un choix judicieux de l'échelle d'observation. La disponibilité des champs de déformations sera d'autant plus appréciée lors des essais hors-plan. Ainsi, dans le cas de la compression sur cubes, compte tenu du faible élanement de ces éprouvettes, la CIN permettra de s'assurer de l'homogénéité des champs de déformations. Pour la flexion en poutre courte, la CIN a été un moyen pour atteindre les modules de cisaillement transverses  $G_{13}$  et  $G_{23}$ , en plus des contraintes à la rupture en cisaillement  $\tau_{13 \text{ ultime}}$  et  $\tau_{23 \text{ ultime}}$  déjà accessible classiquement par cet essai. Le principe de cette technique est basé sur le suivi du champ de déplacement d'un ensemble de points déposés sur la surface de l'éprouvette. Ce suivi est réalisé à l'aide d'une camera haute performance "SensiCam\_QEPCO" équipée d'un capteur CCD N&B.

Afin de faciliter le positionnement spatial sur les clichés, une texture est appliquée sur la surface de l'échantillon. Dans notre cas, cette texture a été déposée par peinture à l'aérographe, pour obtenir des points contrastés dispersés aléatoirement dans le plan. Après avoir dégraissé la surface, une peinture de fond blanc mat est appliquée de manière à cacher la texture naturelle du composite (fond neutre). Après séchage, un aérographe est utilisé pour projeter aléatoirement des gouttelettes de différentes tailles de peinture noire mate sur le fond blanc. L'aérographe nous permet de contrôler efficacement la quantité de peinture noire pour obtenir un mouchetis ni trop clair, ni trop foncé dont les contrastes couvriront l'ensemble des nuances de gris. La Figure 60 (a), donne un aperçu d'une surface mouchetée, préparée pour la CIN.

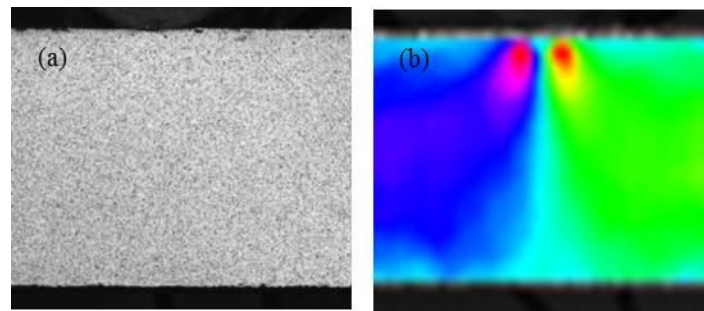


Figure 60: (a) Exemple Surface mouchetée ; (b) Champ de déplacement CIN.

## IV.2 Caractéristiques dans le plan

### IV.2.1 Matériaux non cousus

#### IV.2.1.1 Traction longitudinale

Pour le stratifié non cousu, compte tenu du fait que le tissu utilisé (G0926) est équilibré, nous considérons que les modules d'élasticité sens chaîne ( $E_1$ ) et sens trame ( $E_2$ ) sont équivalents. Il en sera de même pour les contraintes à la rupture correspondantes ( $X^+$  et  $Y^+$ ). Par conséquent, pour les matériaux non cousus, les mesures ne seront faites que dans le sens chaîne (sens 1). Cet essai permet également d'atteindre le coefficient de Poisson  $\nu_{12}$ .

La mesure des déformations longitudinale  $\varepsilon_x$  et transversale  $\varepsilon_y$  est obtenue par CIN, en faisant la moyenne des champs de déformation dans la zone de mouchetis, Figure 61. Toutes les grandeurs géométriques sont mesurées en faisant une moyenne d'au moins cinq mesures. Pour cet essai, quatre éprouvettes ont été prélevées à partir des plaques non cousues de 3 mm.

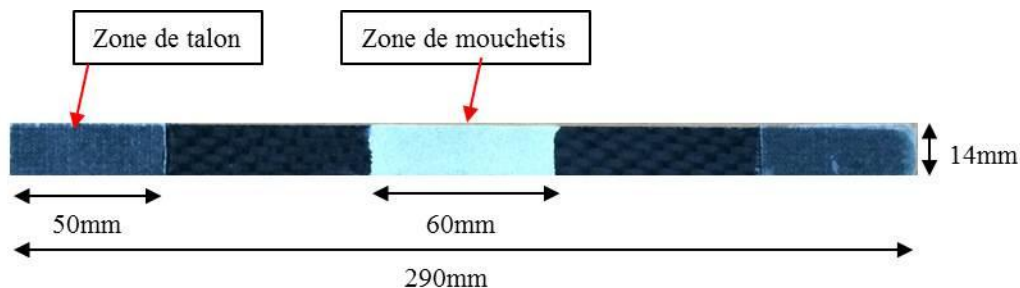


Figure 61: Matériau non cousu, éprouvette de traction sens chaîne.

**IV.2.1.2 Traction inclinée à 45°**

Le module de cisaillement plan  $G_{12}$  et la contrainte à la rupture correspondante  $\tau_{12 \text{ ultime}}$ , ont été obtenus à travers un essai de traction inclinée à 45°. Les expressions de ces deux paramètres sont les suivantes :

Le module de cisaillement étant la pente à l'origine de la courbe  $\tau_{12} = f(\gamma_{12})$  :

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} \quad (\text{IV-1})$$

Avec

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_x}{2} = \frac{F}{2bh} \quad (\text{IV-2})$$

et

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (\text{IV-3})$$

L'expression finale du module de cisaillement plan sera donc :

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} = \frac{F}{2bh(\varepsilon_x - \varepsilon_y)} \quad (\text{IV-4})$$

Avec : b et h respectivement la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette, et F la charge appliquée (N).

Pour cet essai, nous avons testé trois éprouvettes prélevées à partir des plaques non cousues de 3 mm (Figure 62).

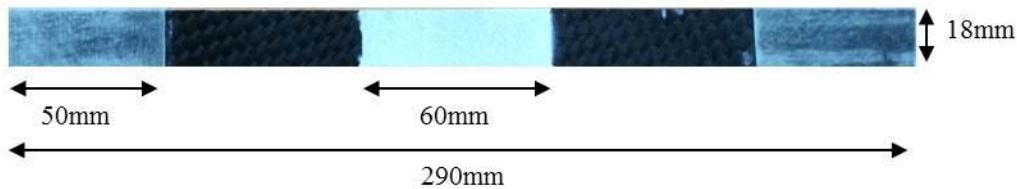


Figure 62 : Matériau non cousu, éprouvette de traction inclinée à 45°.

Les caractéristiques mécaniques dans le plan, obtenues pour le matériau non cousu sont résumés dans le Tableau 17.



Tableau 17: Caractéristiques mécaniques planes du matériau non cousu.

Paramètres	Valeur moyenne
$E_1$ (GPa) (= $E_2$ )	$53.3 \pm 5 \%$
$\nu_{12}$	$0.3527 \pm 9 \%$ ,
$X^+$ (MPa) (= $Y^+$ )	$627 \pm 2 \%$
$G_{12}$ (GPa)	$2.72 \pm 2 \%$ ,
$\tau_{12 \text{ ultime}}$ (MPa)	$101 \pm 1 \%$

#### IV.2.2 Matériaux cousus

Pour ces matériaux la présence de la couture modifie l'architecture de la préforme. En référence aux repères d'orthotropie définis dans le chapitre II, la similitude des caractéristiques planes n'est, à priori, plus valable ( $E_1 \neq E_2$  et  $X^+ \neq Y^+$ ). Par conséquent, les essais dans les deux directions (1 et 2) seront abordés. La Figure 63, donne un aperçu de la disposition des coutures pour les éprouvettes de traction longitudinale (a), transversale (b) et inclinées à  $45^\circ$  (c).

Dans le cas particulier des éprouvettes de traction longitudinale, compte tenu des contraintes mises en jeu (limitations de la machine de traction), nous nous sommes imposé un minimum de deux rangs de coutures pour les différentes densités de coutures testées.

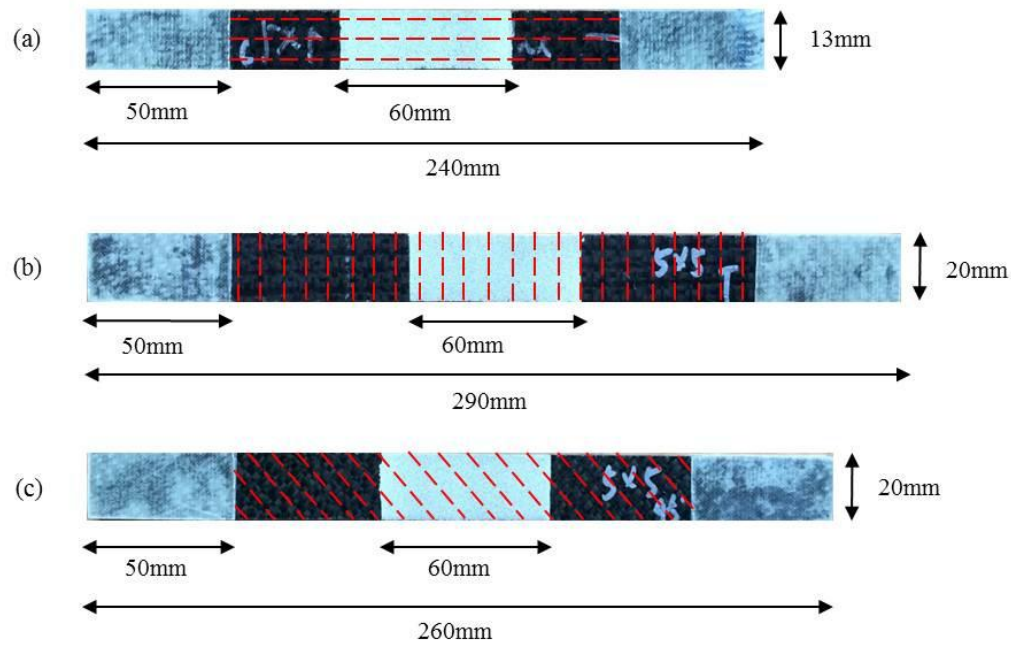


Figure 63: Disposition des coutures des éprouvettes de traction.

Ces éprouvettes (quatre par type d'essai) ont été découpées à partir de plaques cousues de 4 mm d'épaisseur. Les caractéristiques mécaniques dans le plan 1-2, obtenues pour les différents matériaux cousus sont résumés dans le Tableau 18.

Tableau 18: Synthèse des caractéristiques mécaniques planes des matériaux cousus.

Pas de 5 mm					
$E_1$ (GPa)	$40.9 \pm 9 \%$	$E_2$ (GPa)	$41.6 \pm 1\%$	$G_{12}$ (GPa)	$2.93 \pm 5\%$
$X^+$ (MPa)	$542 \pm 11\%$	$Y^+$ (MPa)	$458 \pm 9 \%$	$\tau_{12}$ (MPa)	$84.7 \pm 3\%$
Pas de 7 mm					
$E_1$ (GPa)	$40.8 \pm 1\%$	$E_2$ (GPa)	$43.8 \pm 6\%$	$G_{12}$ (GPa)	$2.94 \pm 2\%$
$X^+$ (MPa)	$607 \pm 3\%$	$Y^+$ (MPa)	$456 \pm 23\%$	$\tau_{12}$ (MPa)	$76.7 \pm 0.4\%$
Pas de 10 mm					
$E_1$ (GPa)	$37.2 \pm 4\%$	$E_2$ (GPa)	$41.1 \pm 8\%$	$G_{12}$ (GPa)	$2.62 \pm 4\%$
$X^+$ (MPa)	$566 \pm 5 \%$	$Y^+$ (MPa)	$542 \pm 9\%$	$\tau_{12}$ (MPa)	$94.6 \pm 2\%$

### IV.2.3 Analyse des résultats

Par comparaison aux données du matériau non cousu l'effet des coutures sur les caractéristiques planes est recensé dans le Tableau 19 pour les modules de traction, Tableau 20 pour les contraintes à la rupture en traction et Tableau 21 pour les caractéristiques au cisaillement plan.

Tableau 19: Comparaison des modules de traction.

Propriété	Matériaux			
	Non cousu	Pas de 5	Pas de 7	Pas de 10
$E_1$ (GPa)	53.3	40.9 <b>- 23 %</b>	40.8 <b>- 24 %</b>	37.2 <b>- 30 %</b>
$E_2$ (GPa)	53.3	41.6 <b>- 22%</b>	43.8 <b>- 18 %</b>	41.1 <b>- 23 %</b>

En première analyse et concernant le module longitudinal, il se dégage une légère tendance vers une dégradation inversement proportionnelle à la densité de couture. Dans le sens transverse ( $E_2$ ), aucune tendance particulière ne se dégage. Ceci s'explique par le fait que dans cette direction, la couture ne contribue pas à la rigidité du matériau.

Concernant les contraintes à la rupture en traction (Tableau 20), des ruptures dans les talons (valeurs marquées par un Astérix), empêchent une analyse précise des résultats. La seule valeur fiable étant le  $X^+ = 607$  MPa, pour le matériau cousu en pas de 7. En se fiant cette valeur, on pourrait dire que les dégradations réelles ne devraient pas être aussi importantes que ceux affichés. Dans de telles conditions, l'influence de la densité de couture ne peut pas être détectée.

Tableau 20: Comparaison des contraintes à la rupture en traction.

Propriété	Matériaux			
	Non cousu	Pas de 5	Pas de 7	Pas de 10
$X^+$ (MPa)	627	542* <b>-13.6 %</b>	607 <b>-3.2 %</b>	566 <b>-9.7 %</b>
$Y^+$ (MPa)	627	458* <b>-27 %</b>	456 * <b>-27.3 %</b>	572 <b>-16 %</b>

Parallèlement à ces résultats, l'observation des faciès de rupture montre que les coutures ont tendance à confiner les endommagements. Comme le montre la Figure 64, la rupture des matériaux non cousus se produit avec de nombreux délaminages au niveau de la zone rompue (Figure 64 (a)), alors que pour les matériaux cousus (quelle que soit la densité de couture), la rupture est franche (Figure 64 (b)).

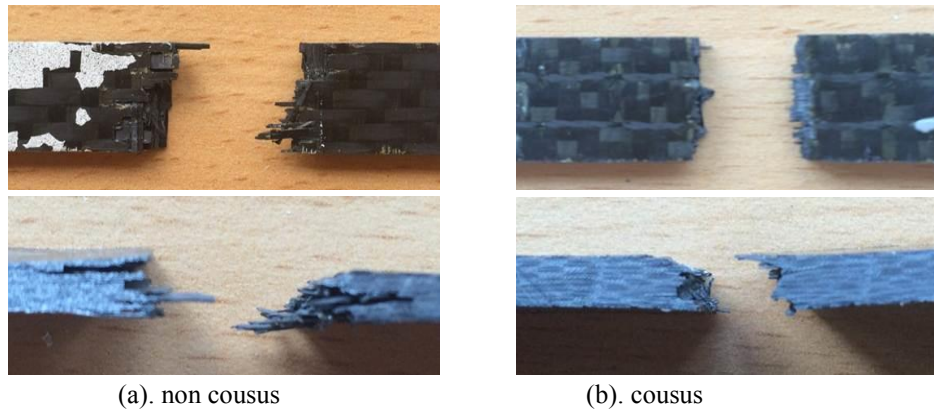


Figure 64 : Faciès de rupture des éprouvettes de traction.

Pour les caractéristiques en cisaillement plan (Tableau 21), il semble que la densité de couture serait en faveur d'une légère amélioration de  $G_{12}$ . Pour la contrainte à la rupture en cisaillement plan, on assiste à une dégradation, sans influence particulière de la densité de couture.

Tableau 21: Comparaison des caractéristiques en cisaillement plan.

Propriété	Matériaux			
	Non cousu	Pas de 5	Pas de 7	Pas de 10
$G_{12}$ (GPa)	2.72	2.93 <b>+7.7 %</b>	2.94 <b>+8.1 %</b>	2.62 <b>-3.7 %</b>
$\tau_{12}$ (max) (MPa)	101	84.7 <b>-16 %</b>	76.7 <b>-24 %</b>	94.6 <b>-6.3 %</b>

À l'issue de ce paragraphe, il ressort que l'introduction des coutures engendre des dégradations plus ou moins importantes suivant la caractéristique plane considérée. Sachant que les coutures visent le renforcement dans la troisième direction de l'espace et qu'elles s'accompagnent

systématiquement d'altérations dans le plan, ce constat semble logique, en accord avec les résultats de la littérature.

Par contre, l'objectif de quantifier l'influence de coutures en fonction de leur densité n'a pas pu être atteint. Ceci est très probablement dû aux défauts structurels engendrés par la couture. Défauts signalés dans la littérature et constatés, pour nos matériaux, dans le chapitre II. Il apparaît que les défauts tels que le désalignement (courbure) des coutures et la présence de fissures autour de celles-ci jouent un rôle prédominant dans la dégradation des propriétés. Ce point sera discuté plus en détail à l'issue de ce chapitre.

### IV.3 Caractéristiques hors-plan

#### IV.3.1 Compression sur cube

La détermination des caractéristiques normales dans le sens de l'épaisseur ( $E_3$ ,  $Z^-$  et  $Z^+$ ) est toujours problématique, car il est techniquement difficile d'obtenir des éprouvettes suffisamment épaisses pour éviter les contraintes parasites dues aux moyens d'introduction des efforts. De ce fait, l'essai de compression sur cube (Figure 65) est une bonne alternative pour contourner ces difficultés.

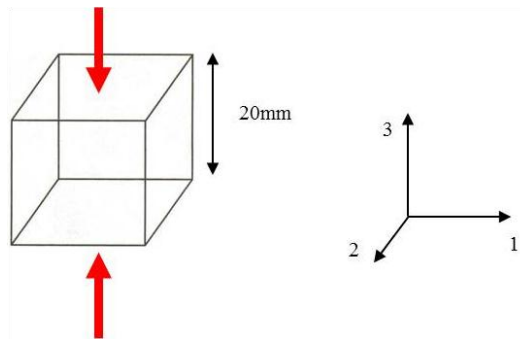


Figure 65 : Epreuve de compression.

Cependant, compte tenu du faible élanement de cette géométrie cubique, il est impératif d'assurer un champ de contraintes uniforme et en compression "pure". Ceci peut être atteint en assurant les deux points suivants :

- 1) Obtenir un excellent parallélisme des faces d'appui des éprouvettes permettant d'assurer une axialité des efforts.

- 2) Réaliser, des appuis à frottement nul, pour s'affranchir de l'hétérogénéité de déformation de l'éprouvette près des appuis.

Les éprouvettes sont donc débitées à partir de plaques de 20 mm en prenant un grand soin pour assurer le parallélisme des surfaces d'appui. De plus, lors de la mise en place de l'échantillon, un film thermoplastique fin, imbibé d'huile, est inséré entre les surfaces de chargement du cube et celles des plateaux d'introduction des efforts. L'intérêt de cette pratique est de minimiser les contraintes de cisaillement au niveau des surfaces de chargement (effet de Poisson).

Grâce à la CIN nous pouvons accéder à la cartographie des champs de déformations et ainsi vérifier la nature et l'homogénéité de ces champs au centre de l'éprouvette. Cette démarche a été faite en déplaçant une jauge virtuelle sur la face d'observation de l'éprouvette. Les faces des cubes sont découpées en 9 zones (Figure 66). Les images sont ensuite traitées sous Matlab, puis le champ de déformations de chaque jauge virtuelle est calculé.

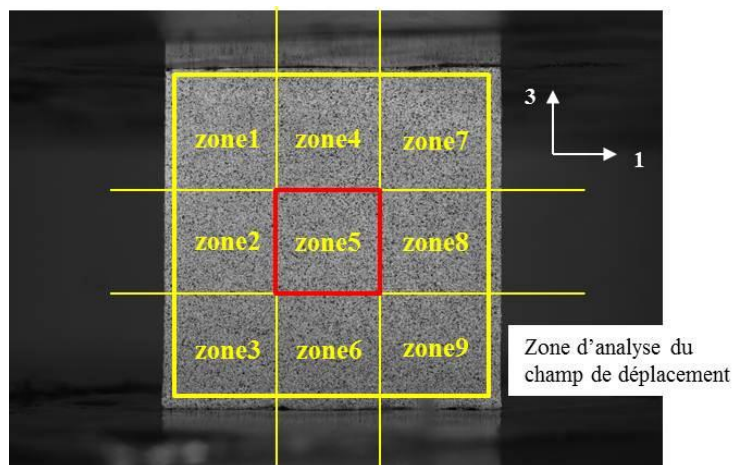
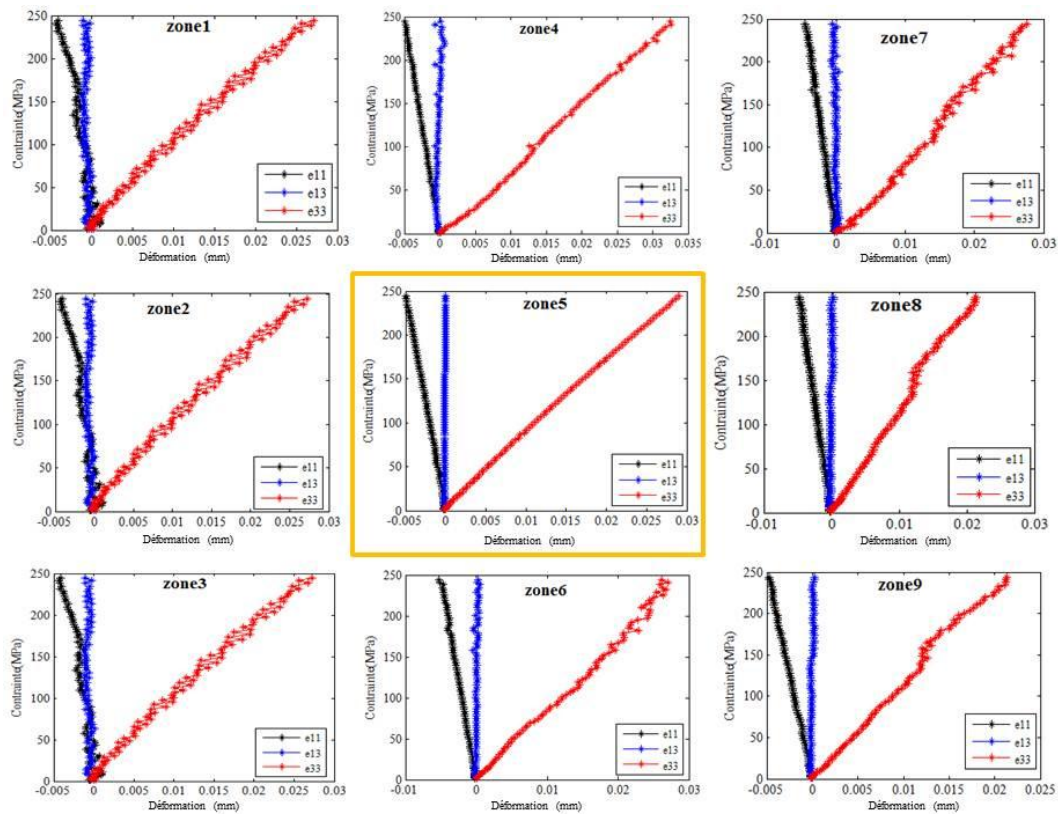


Figure 66: Analyse par CIN des faces des cubes en compression.

Comme le montre la Figure 67, les zones frontalières possèdent des champs de déformation légèrement perturbés, alors que la zone centrale (zone 5) présente un champ de déformation en compression pure (cisaillement nul- courbe en bleu sur la figure).



Légende : rouge =  $\epsilon_{33}$ , bleu =  $\epsilon_{13}$  et noir =  $\epsilon_{11}$

Figure 67: Champ de déformation des 9 zones analysées.

Les résultats obtenus sur trois éprouvettes sont résumés dans le Tableau 22:

Tableau 22: Résultats des essais de compression sur cube, matériau non cousu.

Paramètres	Valeur moyenne
$E_3(GPa)$	$8.5 \pm 1 \%$
$Z^- (MPa)$	$721 \pm 1\%$

#### IV.3.1.1 Matériaux cousus

Dans le cas spécifique de la compression sur cubes des matériaux cousus, pour atteindre les caractéristiques à la rupture, le dimensionnement des éprouvettes reste délicat, en ce sens qu'il faut tenir compte des différentes densités de coutures, d'une épaisseur fixe de 20 mm, tout en restant dans les limites de la capacité de la machine d'essai, de 200 KN. Tenant compte de ses

impératifs, les éprouvettes n'auront plus des formes cubiques, mais plutôt parallélépipédiques. Le principe étant de garder un élanement le plus grand possible. Avec ce raisonnement et pour les trois densités de coutures, les éprouvettes sont découpées dans les dimensions suivantes (Figure 68):

- Pas de 5 mm : surface d'appui de 15mm\*15mm avec 9 points de coutures (Figure 68-(a)).
- Pas de 7 mm : surface d'appui de 16mm\*13mm avec 6 points de coutures (Figure 68-(b)).
- Pas de 10 mm : surface d'appui de 15mm\*15mm avec 4 points de couture (Figure 68-(c)).

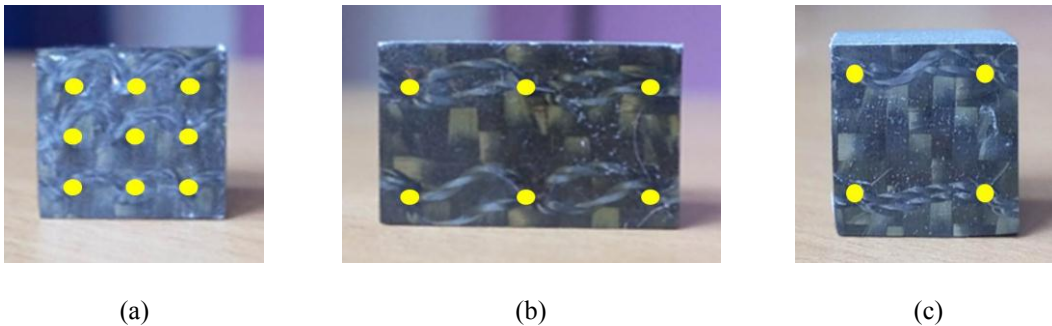


Figure 68 : Surfaces d'appui et points de coutures des éprouvettes de compression en Z.

Pour chaque densité de couture, 4 éprouvettes ont été testées avec une vitesse de déplacement de la traverse de 1 mm/mn. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau (Tableau 23).

Tableau 23: Résultats de la compression en Z pour matériaux cousus.

Densité de couture	Propriétés mesurées	Valeurs moyennes
Pas de 5	$E_3$ (GPa)	$9.4 \pm 1.3 \%$
	$Z^-$ (MPa)	$619 \pm 1.7 \%$
Pas de 7	$E_3$ (GPa)	$9.2 \pm 0.2 \%$
	$Z^-$ (MPa)	$606 \pm 4.5 \%$
Pas de 10	$E_3$ (GPa)	$8.90 \pm 0.4 \%$
	$Z^-$ (MPa)	$605 \pm 2.5 \%$

La comparaison au matériau non cousu (Tableau 24) montre qu'en élasticité, le comportement est légèrement amélioré avec une influence de la densité de couture bien discernable. Pour la



contrainte à la rupture, on constate une atténuation d'environ 15 % quelle que soit la densité de couture.

Tableau 24: Comparaison des caractéristiques en compression suivant Z.

Propriété	Matériaux			
	Non cousu	Pas de 5	Pas de 7	Pas de 10
$E_3$ (GPa)	8.5	9.4	9.2	8.9
		<b>+10.6 %</b>	<b>+8.2 %</b>	<b>+4.7 %</b>
$Z^-$ (MPa)	721	619	606	605
		<b>-14 %</b>	<b>-16 %</b>	<b>-16 %</b>

Que ce soit en élasticité ou en résistance, ces résultats sont quelque peu surprenants. Les coutures étant disposées dans la direction de sollicitation, on s'attendrait à des améliorations beaucoup plus significatives et surtout pas à des dégradations. La comparaison à la littérature est difficile étant donné que dans la 3<sup>ème</sup> direction de l'espace, très peu de données sont disponibles. Une comparaison raisonnable peut être faite avec les travaux de X. Zhang [114]. Dans ces travaux, réalisés sur des composites en Verre/Polyester, cousus en Tufting et imprégnés par le procédé d'infusion, on relève des modules  $E_3$  améliorés de plus de 200 % et des contraintes à la rupture  $Z^-$  de plus de 50 %, ceci pour des densités de couture équivalentes à ceux de notre étude.

La remarque faite concernant les défauts de désalignement est d'autant plus parlante pour la compression sens Z. Des coutures courbées (Figure 69 (a)) ou vrillées (Figure 69 (b)) avant la sollicitation auront un comportement équivalent à des poutres en flambement. En rigidité, l'apport ne peut être que minime, vis-à-vis de la résistance en compression, ce comportement ne peut que précipiter la rupture.



(a) Courbures



(b) Vrillage

Figure 69: Illustration des défauts des coutures après fermeture du moule RTM.

### IV.3.2 Comportement au cisaillement hors-plan

Les dispositifs d'essais permettant d'accéder au comportement en cisaillement hors-plan des matériaux composites restent très limités. Les plus accessibles étant la torsion sur barreau rectangulaire et la flexion trois-points sous appuis rapprochés. Ce dernier type d'essai a l'avantage d'être facile à mettre en œuvre. Il est communément pratiqué pour atteindre les contraintes à la rupture en cisaillement inter laminaire  $\tau_{13 \text{ ultime}}$  et  $\tau_{23 \text{ ultime}}$ . Avec l'avènement des techniques de corrélation d'images numériques, il devient possible d'accéder aux différents champs de déformation des plans sollicités. Pour l'essai de flexion trois-points sous appuis rapprochés, cette technique ouvre donc de nouvelles perspectives pour caractériser les modules de cisaillement hors plan des matériaux composites ayant des architectures de renforcement complexes telles que les matériaux cousus, sujets de cette étude.

En flexion trois-points (Figure 70), l'état de cisaillement pur est obtenu avec des élanements allant de 2 à 6 ( $2 < L/h < 6$ ). Dans le dimensionnement des éprouvettes, pour éviter les effets de bords [115], le rapport  $b/h$  doit être le plus proche possible de l'unité (largeur = épaisseur).

#### IV.3.2.1 Fondements théoriques

L'essai de flexion trois-points sur appuis rapprochés peut être schématisé de la façon suivante (Figure 70, dans le cas d'une sollicitation du plan  $xz$ ).

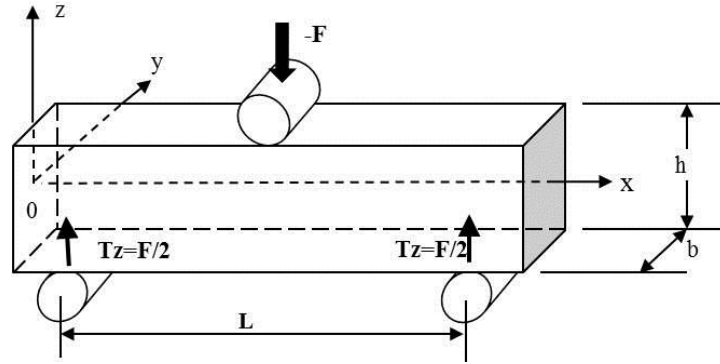


Figure 70: Schéma de l'essai de flexion 3 points sous appuis rapprochés.

Le module de cisaillement  $G_{xz}$  est obtenu à travers la loi de Hooke qui lie la déformation de cisaillement  $\gamma_{xz}$  à la contrainte tangentielle  $\tau_{xz}$ :

$$\tau_{xz} = G_{xz} \cdot \gamma_{xz} \quad (\text{IV-5})$$

La contrainte tangentielle est reliée à la sollicitation appliquée par la relation suivante :

$$\tau_{xz}(z) = \frac{6 \cdot T_z}{b \cdot h^3} \left( \frac{h^2}{4} - z^2 \right) \quad (\text{IV-6})$$

Avec  $b$  : largeur de l'éprouvette,  $h$  : hauteur de l'éprouvette  
 $z$  : variable comprise entre  $-h/2$  et  $h/2$ ,  $T_z$  : réaction au niveau des appuis

La fonction  $\tau_{xz}(z)$  est une parabole qui atteint son maximum au niveau de la fibre neutre ( $z = 0$ ) (Figure 71).

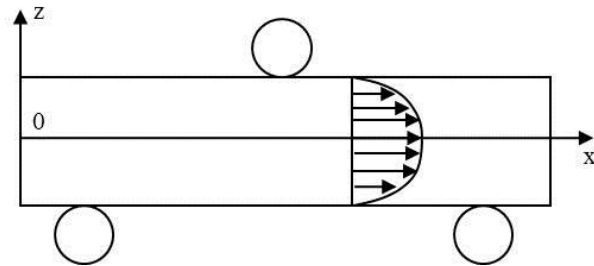


Figure 71: Distribution théorique de la contrainte de cisaillement.

Dans la pratique, la sollicitation introduite au niveau de l'appui central entraîne un décalage de la distribution des contraintes de cisaillement par rapport à l'axe neutre de la poutre (Figure 72, [116]).

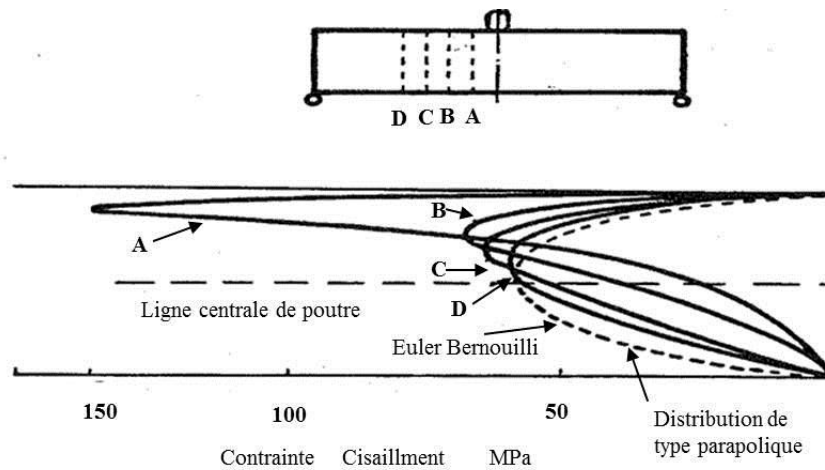


Figure 72: Distribution des contraintes dans un essai de flexion sous appuis rapprochés.

Ainsi, dans une démarche de détermination du module de cisaillement, il est important de localiser une zone d'étude la moins perturbée, suffisamment éloignée de la zone d'introduction des efforts.

#### IV.3.2.2 Démarche d'obtention des modules de cisaillement

De façon synthétique, cette démarche consiste à déterminer expérimentalement, par l'intermédiaire de la CIN, le champ de déformations en cisaillement sur une zone appropriée. Cette zone doit satisfaire les deux critères suivants:

- 1) La contrainte de cisaillement doit être prédominante au regard des autres types de contrainte (traction- compression).
- 2) Le profil du cisaillement suivant l'épaisseur de l'éprouvette doit être conforme à la théorie élastique, c'est-à-dire que sa distribution doit refléter l'équation d'une parabole.

Ensuite, ce champ est moyenné sur la zone retenue et relié à une contrainte théorique calculée à partir de l'effort appliqué au cours de l'essai. En effectuant une régression linéaire du rapport de la contrainte théorique ( $\tau_{ij}$ ) sur la déformation moyenne mesurée expérimentalement ( $\gamma_{ij}$ ), on

peut alors déduire le module de cisaillement ( $G_{ij}$ ) du matériau testé. Cette démarche, schématisée par la Figure 73, a été appliquée pour les deux types de matériaux (cousu et non cousu) et pour les deux plans de cisaillement 1-3 et 2-3.

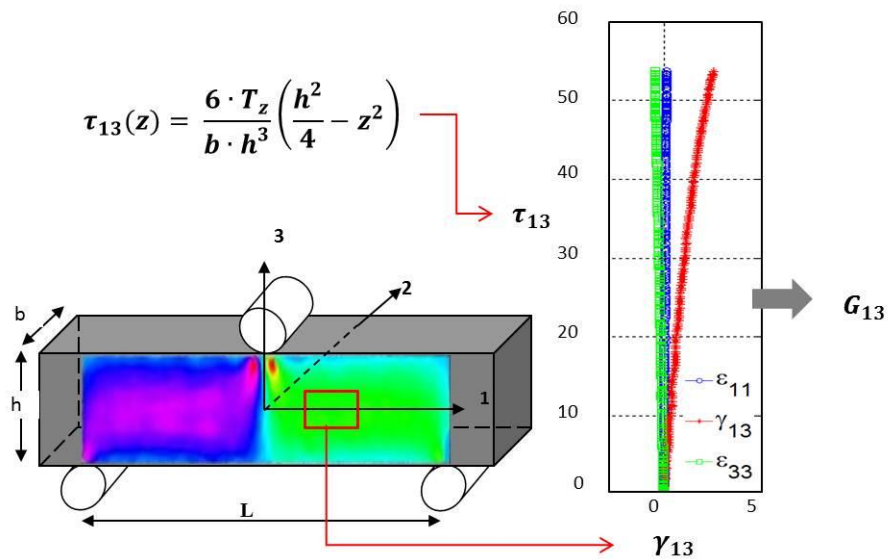


Figure 73 : Principe de la démarche d'obtention des modules de cisaillement transverses.

#### IV.3.2.2.1 Choix de la zone de mesure

Les états de déformations étant symétriques par rapport à l'appui central, l'étude a été restreinte à la moitié de la surface de l'éprouvette. Dans le traitement des données issues de la CIN, on met en place une jauge virtuelle qu'on déplace sur toute l'étendue de cette zone. Les déplacements horizontaux et verticaux de cette jauge virtuelle sont respectivement de 30 et 11 répétitions, (Figure 74).

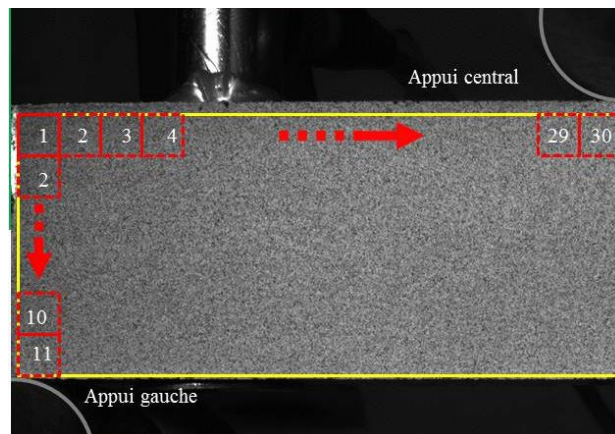


Figure 74: Déplacement en balayage de la jauge virtuelle.

À partir de ce balayage, il est possible de cartographier les champs de déformation en  $\epsilon_{ii}$ ,  $\epsilon_{jj}$  et  $\epsilon_{ij}$  et ainsi de déterminer la zone qui respecte les deux critères cités précédemment. Afin d'obtenir une analyse, la plus fine possible de ces déformations, la zone d'étude est subdivisée en 5 colonnes et 11 lignes (Figure 75).

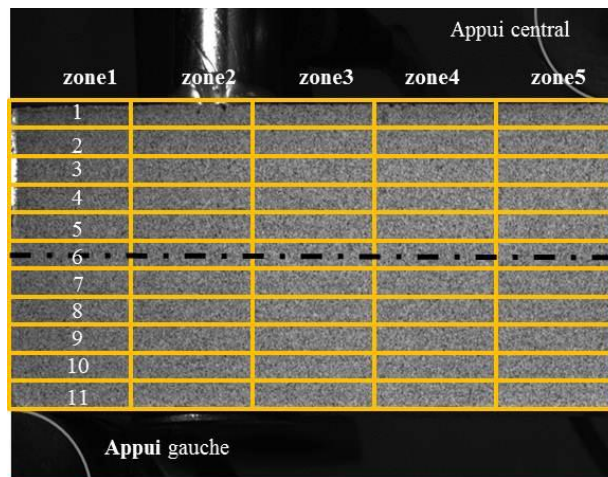


Figure 75: Découpage de la zone d'étude.

À titre d'exemple, cette démarche est décrite ci-dessous, pour un plan 1-3 et pour une sollicitation arbitraire de 3176 N. Conformément la théorie des poutres et comme le montre la Figure 76, la déformation  $\epsilon_{11}$ , n'annule au voisinage de la fibre neutre (lignes 5, 6 et 7 **en bleu sur la figure**).

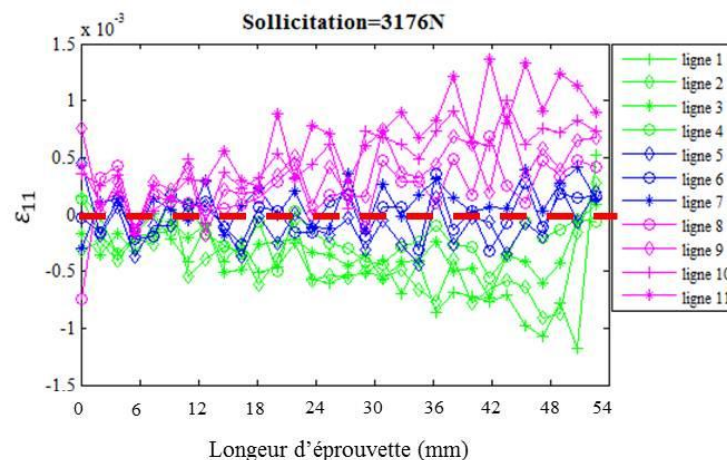
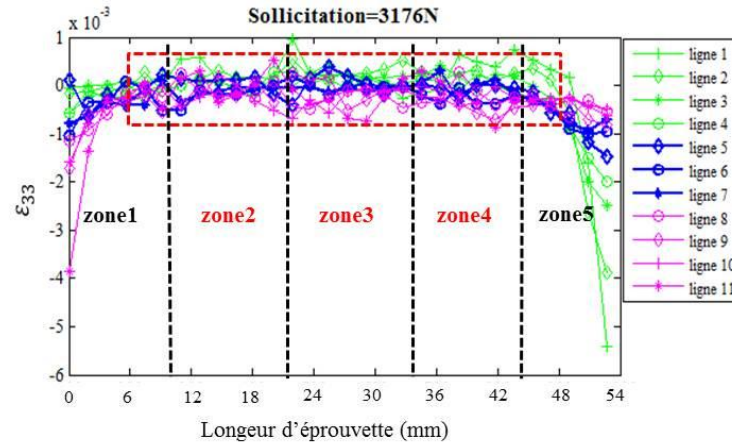
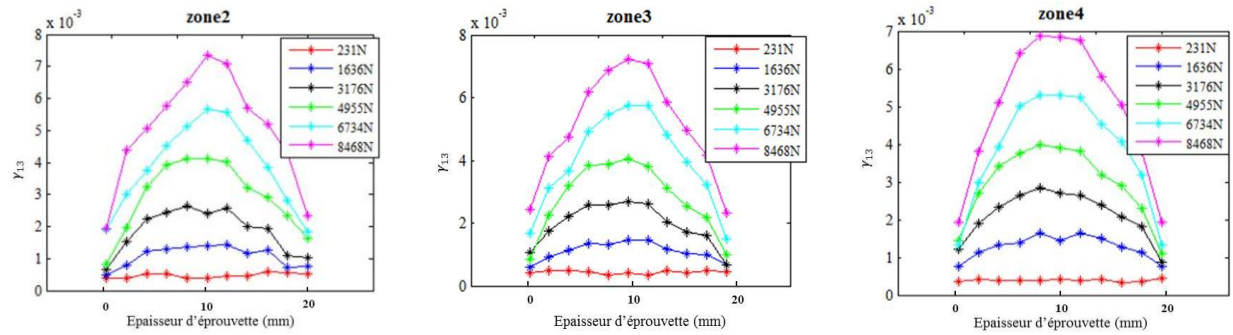


Figure 76: Evolution de la déformation longitudinale sur la longueur de l'éprouvette.

Concernant la déformation transverse  $\epsilon_{33}$ , (Figure 77), elle se manifeste au voisinage des appuis et se réduit dans les zones centrales (zones 2, 3 et 4 sur la figure).

Figure 77: Distribution de la déformation transverse  $\varepsilon_{33}$  le long de l'éprouvette.

À partir de cette première approche, l'étude doit se focaliser sur les zones 2, 3 et 4. Dans ce domaine, l'allure, dans l'épaisseur de l'éprouvette, de la déformation en cisaillement est donnée par la Figure 78.

Figure 78: Profile de la déformation en cisaillement  $\gamma_{13}$ .

Cette figure montre que dans la zone 4 la déformation de cisaillement a un profil parabolique avec un maximum au niveau de la fibre neutre, conformément à la théorie. Au sein de cette zone, il reste à sélectionner un domaine où la déformation de cisaillement est dominante et non perturbée par la présence de  $\varepsilon_{11}$  ou  $\varepsilon_{33}$ . Pour cela on évalue les rapports de  $\varepsilon_{11}/\gamma_{13}$  et  $\varepsilon_{33}/\gamma_{13}$ . Comme le montre la Figure 79, au niveau de la zone 4, la présence des déformations parasites  $\varepsilon_{11}$  et  $\varepsilon_{33}$  est minimale au niveau des lignes 5, 6 et 7.



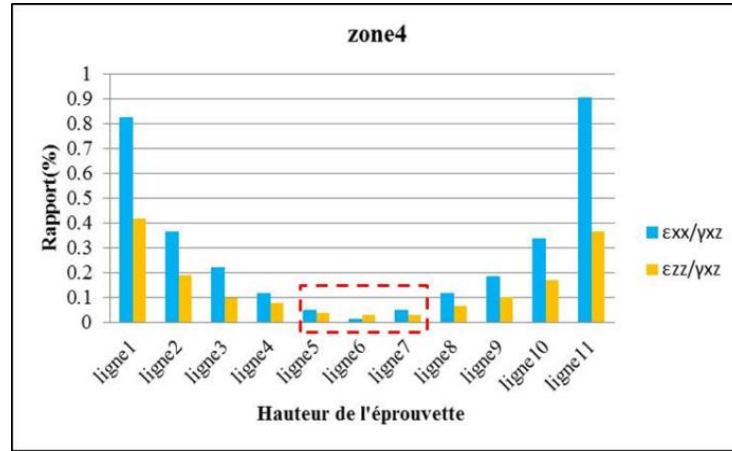


Figure 79 : Influence des déformations parasites sur la déformation de cisaillement.

Ainsi, la zone propice à la mesure du module de cisaillement transverse sera la zone 4, lignes 5,6 et 7, (Figure 80).

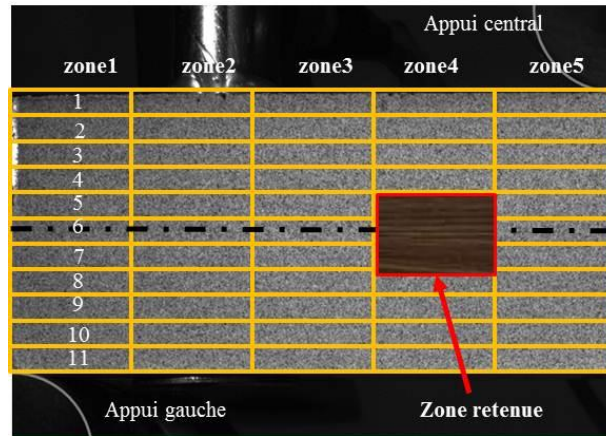


Figure 80: Zone retenue pour la mesure du module de cisaillement.

Le module de cisaillement sera obtenu par la pente à l'origine de la courbe  $\tau_{13} = f(\gamma_{13})$ . La contrainte à la rupture interlaminaire est obtenue à travers l'expression :

$$\tau_{13} = \frac{3 \cdot P_r}{4 \cdot b \cdot h} \quad (IV-7)$$

avec :  $P_r$  = Charge à la rupture,  $b$  = Largeur de l'éprouvette,  $h$  = Hauteur de l'éprouvette.



### IV.4.2.3 Matériaux non cousu

Pour atteindre les caractéristiques de cisaillement dans les plans 1-3 et 2-3, les éprouvettes sont découpées à partir des plaques de 20 mm d'épaisseur, Figure 81. Ces éprouvettes sont caractérisées par une distance entre appuis de 100 mm ( $5 \times h$ ), une longueur totale de 140 mm ( $7 \times h$ ) et une largeur de 20 mm ( $1 \times h$ ).

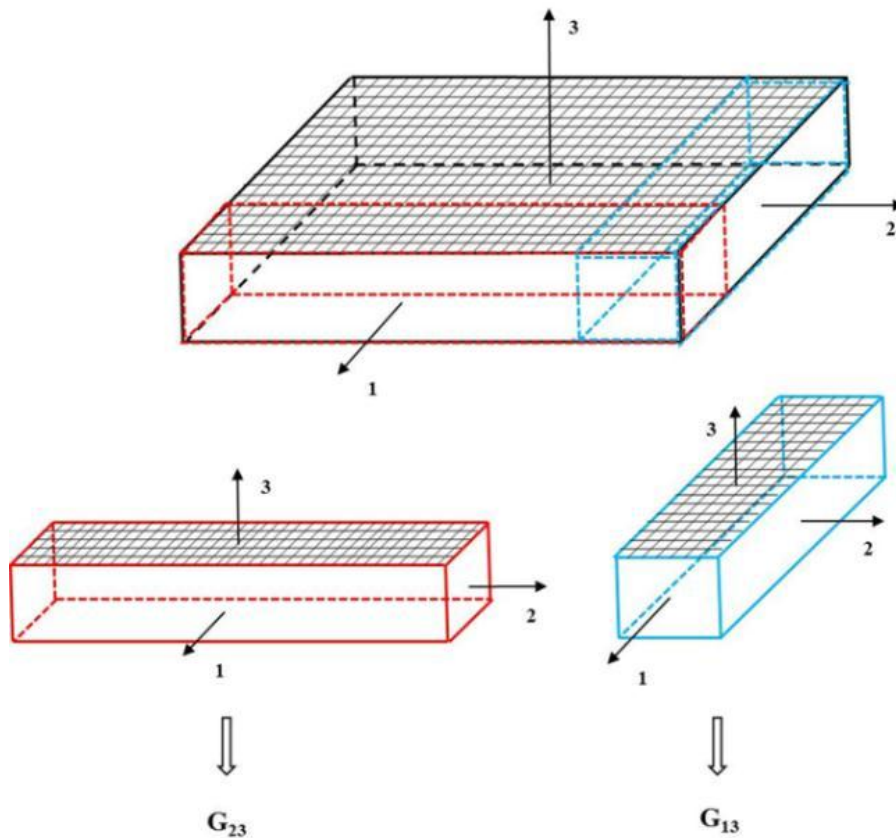


Figure 81: Plan de découpe des éprouvettes de flexion.

Les essais ont été réalisés sur une machine INSTRON 1186 de capacité 200KN. La vitesse de déplacement de la traverse est fixée à 1 mm/mn. La Figure 82 illustre cet essai avec l'équipement de CIN et l'éclairage nécessaire.

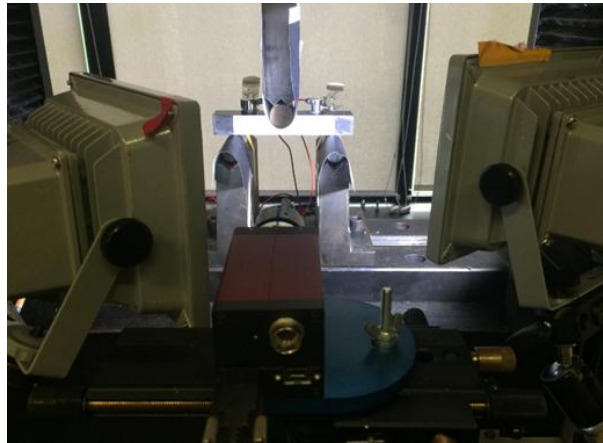


Figure 82 : Illustration d'un essai de flexion trois-points

Les résultats sont résumés dans le Tableau 25 ci-dessous :

Tableau 25: Caractéristiques de cisaillement transverse pour le matériau non cousu.

Paramètres	Valeur moyenne
$G_{13}(GPa)$	$2.48 \pm 2\%$
$G_{23}(GPa)$	$2.44 \pm 4\%$
$\tau_{13 \max} (MPa)$	$52 \pm 7\%$
$\tau_{23 \max} (MPa)$	$49.5 \pm 7\%$

#### IV.3.2.4 Matériaux cousus

Comme pour les essais de compression sur cubes, pour accéder à un effet macroscopique de l'apport des coutures, les éprouvettes doivent contenir un minimum de trois rangs de coutures, pour les différentes densités de coutures. Les caractéristiques morphologiques de ces éprouvettes de flexion seront les suivantes :

- Pas de couture de 5 mm : 4 rangs de couture, largeur éprouvette = 21.5 mm.
- Pas de couture de 7 mm : 3 rangs de couture, largeur éprouvette = 18.5 mm.
- Pas de couture de 10 mm : 3 rangs de couture, largeur éprouvette = 27 mm.

Ce choix est fait de sorte à conserver des largeurs les plus proches possible de l'épaisseur de la plaque (20 mm).

Pour déterminer la zone propice au calcul du module de cisaillement, on procède de la même manière que pour les matériaux non cousus, cependant par la présence des coutures, des précautions particulières doivent être prises pour apprécier un module macroscopique de la structure et non pas une rigidité locale, liée à la couture. Comme le montre la Figure 83, le champ de cisaillement est bien perturbé par la présence des coutures.

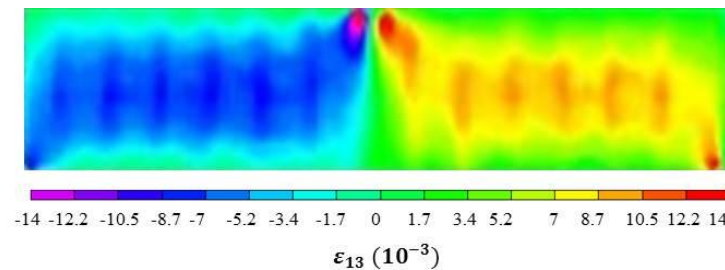


Figure 83 : Exemple de champ de cisaillement en présence des coutures, (couture en pas de 7).

La démarche a consisté à vérifier que la zone propice au calcul du module de cisaillement n'est spécifique, ni à une zone sans coutures (zone entre deux coutures), ni à une zone ne contenant qu'une couture. Ceci, dans le respect des deux conditions d'application de la méthode.

Pour cela, la surface d'étude a été subdivisée (en colonnes) plus finement que pour les matériaux non cousus (50 colonnes au lieu de 5) afin de distinguer les quatre configurations suivantes, (Figure 84) :

- Zone entre deux coutures (a).
- Zone ne contenant qu'une couture (b).
- Zone contenant 1 couture entourée par des zones sans couture (c).
- Zone contenant 2 coutures entourées par des zones sans couture (d).

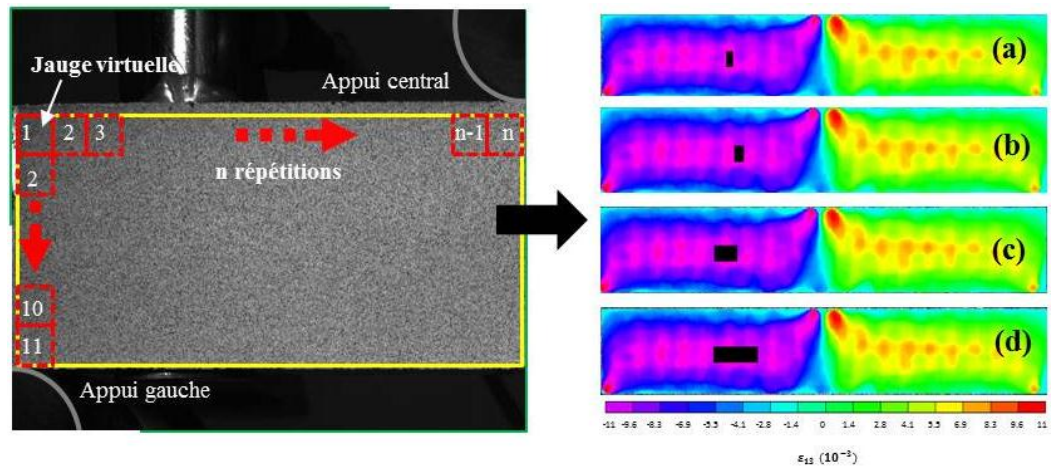


Figure 84: Découpage de la zone d'étude pour les matériaux cousus.

Le Tableau 26 présente les résultats des modules de cisaillements dans le plan 1-3, obtenus pour un matériau cousu en pas de 5 :

Tableau 26: Résultats des essais de flexion dans le plan 1-3, pour les matériaux cousus en pas de 5.

	$G_{13}(GPa)$	$\tau_{13}(MPa)_{max}$
Zone sans couture : (a)	$2.56 \pm 4\%$	
Zone de couture : (b)	$2.16 \pm 7\%$	
1 couture entourée : (c)	$2.47 \pm 3\%$	$40.4 \pm 2\%$
2 coutures entourées : (d)	$2.47 \pm 4\%$	

Ces résultats montrent que la zone de mesure du module de cisaillement doit, au minimum, contenir une couture entourée de zones non cousues, pour être représentative de la structure.

Dans la localisation de la zone propice à la mesure du module de cisaillement, cette vérification a été appliquée pour les trois densités de couture et pour les plans 1-3 et 2-3. Le Tableau 27 résume les résultats obtenus :

Tableau 27: Caractéristiques en cisaillement hors-plan des matériaux cousus.

Matériau	$G_{13}$ (GPa)	$\tau_{13\max}$ (MPa)	$G_{23}$ (GPa)	$\tau_{23\max}$ (MPa)
Cousus $5 \times 5$	$2.47 \pm 4 \%$	$40.4 \pm 2\%$	$2.40 \pm 2\%$	$40.6 \pm 2\%$
Cousus $7 \times 7$	$2.44 \pm 2\%$	$44.6 \pm 2\%$	$2.38 \pm 2\%$	$46.2 \pm 3\%$
Cousus $10 \times 10$	$2.40 \pm 2\%$	$45.4 \pm 2\%$	$2.38 \pm 1\%$	$44.7 \pm 5\%$

Comparativement, au matériau non cousu, les modules de cisaillement  $G_{13}$  et  $G_{23}$  sont quasiment inaltérés par la présence des coutures. En résistance au cisaillement interlaminaire dans le plan 1-3 (Tableau 28), la dégradation constatée est proportionnelle à la densité de couture. Dans le plan 2-3, on atteint le même niveau de dégradation ( $\pm 20 \%$ ) pour la plus forte densité, sans tendance particulière de l'influence de la densité de couture.

Tableau 28: Comparaison des résistances au cisaillement interlaminaire.

Propriété	Matériaux			
	Non cousu	Pas de 5	Pas de 7	Pas de 10
$\tau_{13\max}$ (MPa)	52	40.4	44.6	45.4
		<b>-22.3 %</b>	<b>-14.2 %</b>	<b>-12.7 %</b>
$\tau_{23\max}$ (MPa)	49.5	40	46.2	44.7
		<b>-19.2 %</b>	<b>-6.7 %</b>	<b>-9.7 %</b>

En conclusion, en comportement au cisaillement hors-plan, les coutures n'ont aucun effet sur la rigidité et dégradent significativement les résistances, pour les fortes densités de couture. Il est fort probable que ces dégradations soient liées aux défauts structurels signalés précédemment.

#### IV.4 Synthèse

À l'issue de ce chapitre, lorsque l'on fait le bilan des caractéristiques mécaniques évaluées, il ressort qu'on assiste à quelques minimales évolutions de certaines d'entre elles ( $G_{12}$  et  $E_3$ ). L'apport des coutures se manifeste davantage en tant que dégradations des caractéristiques planes et de cisaillement hors-plan.

Conformément aux résultats de la littérature, les dégradations des caractéristiques planes, peuvent être considérées comme légitimes, inhérentes au procédé de couture. Toutefois, elles ne peuvent être tolérées qu'en contrepartie de renforcements très significatifs de celles hors-plan (épaisseur), ce qui n'a pas été clairement le cas.

Ces résultats sont très probablement la conséquence de l'action conjuguée des deux défauts structurels constatés au chapitre II : les défauts de courbure et vrillage des coutures et la présence de fissures et porosité en leur sein. Ces deux types de défauts semblent avoir des conséquences dramatiques, prédominantes par rapport aux autres types de défauts induits par la couture, tels que la rupture de fibre ou la courbure (dans le plan) des torons du stratifié de base. À ce titre, l'essai de compression sur cube a été très révélateur.

Le défaut de désalignement des coutures, dans l'épaisseur, a été constaté par certains auteurs (cf. chapitre I) pour des coutures de type "Lock-Stitch" ou "Modified Lock-Stitch", technologies de coutures ayant fait l'objet de la grande majorité des travaux de la littérature. Pour ce type de coutures dites "*fermées*", le désalignement des coutures peut être contrôlé par la tension du fil de couture. Le principe consiste à réaliser, lors du processus de couture, un compactage de la préforme, le plus proche possible, du compactage final produit par la fermeture du moule RTM. Le Tufting est une des rares technologies de couture "*ouverte*". Cette particularité fait qu'il est difficile de contrôler le compactage de la préforme, uniquement par la couture : le fil de couture étant introduit "sans tension" dans la préforme.

Concernant les porosités et fissures détectées au sein des coutures, leur présence peut être interprétée par les gradients de perméabilités mis en relief dans le chapitre III. Ces gradients de perméabilité conduisent à la fermeture du flux d'écoulement de surface sur celui à cœur et favorisent l'existence de ces porosités.

## Chapitre V Conclusions et Perspectives

Ces travaux ont eu pour objectif d'évaluer l'apport des coutures de type "*Tufting*" dans le renforcement transverse de matériaux composites constitués par des empilements de tissus 2D. Cette évaluation a été abordée à travers l'étude de l'influence de la densité de coutures.

L'impact de ce procédé de couture a été considéré selon deux volets : D'une part du point de vue "process", à travers l'évaluation de la perméabilité des préformes cousues ; et d'autre part du point de vue du comportement mécanique des composites fabriqués à partir de ces préformes.

Ce travail ambitieux, à la croisée des chemins de la mécanique des matériaux et de la mécanique des fluides, a mobilisé de nombreuses compétences et moyens expérimentaux.

Dans la fabrication des matériaux composites, nous nous sommes imposé de réaliser des matériaux ayant les mêmes TVf que ceux des préformes dédiées à l'étude de la perméabilité. Ceci nous a orientés vers le RTM, technologie de moulage où le TVf peut être contrôlé. Pour les besoins des essais mécaniques hors-plan, cette technique a été utilisée pour la réalisation de plaques de 20 mm, épaisseur peu commune dans la réalisation des structures composites.

Dans la mise en place des essais mécaniques, la présence des coutures nécessite des précautions particulières pour atteindre les caractéristiques visées. En autres, les dimensions des éprouvettes doivent être adaptées en fonction du type d'essai et du nombre de coutures. Ceci est d'autant plus vrai pour les caractéristiques hors-plan où le choix du type d'essai le plus adapté est très limité.

L'évaluation des perméabilités a été réalisée par la méthode dite "à flux unidirectionnel". Comparativement à la méthode à flux radiale, cette méthode est réputée pour être plus fiable. Cependant, elle s'avère être excessivement chronophage et très consommatrice de matière première (tissus).

Dans le chapitre IV, les caractéristiques mécaniques obtenues ont été bien en deçà des performances attendues. Les raisons de ces performances médiocres sont à associer à certains facteurs combinés :

D'une part, au procédé de Tufting qui n'autorise pas de compactage contrôlé de la préforme : Lorsqu'il est associé à un procédé de moulage de type RTM, les coutures auront tendance à se vriller ou se courber lors de la fermeture du moule.

D'autre part, à la couture proprement dite, qui perturbe, localement, mais fortement, l'architecture de l'empilement de base. Cette perturbation d'architecture a pour conséquence l'apparition de gradients de perméabilité qui induisent des écoulements différenciés, très prononcés entre la surface et le cœur de la préforme. Ces écoulements différenciés provoquent des fermetures du front d'avancée du fluide d'imprégnation qui favorisent la présence des porosités au sein, ou dans le voisinage proche des coutures.

## **PERSPECTIVES**

La perméabilité des préformes cousues a été abordée à travers l'étude de trois différentes densités de couture ; pour une épaisseur donnée de préforme. Au-delà des conclusions citées précédemment, les résultats obtenus permettent d'envisager le développement d'un modèle analytique, simple, capable de prédire la perméabilité des préformes cousues (en Tufting), en fonction de la densité de couture. Pour cela, il serait intéressant de poursuivre cette étude pour des préformes de différentes épaisseurs, afin de faire émerger, de façon plus accrue, l'influence de la portion de fil située au cœur de la préforme. Il est bien connu que le développement des structures composites obtenues par RTM, passe nécessairement par la modélisation numérique du procédé, où la perméabilité joue un rôle déterminant. Dans ce contexte, sachant que la détermination expérimentale de la perméabilité a un coût non négligeable, le modèle envisagé trouvera toute sa place dans le développement des structures composites cousues.

Il serait également intéressant d'étudier l'influence de la taille du fil de couture, ou plus exactement du couple "diamètre de l'aiguille/diamètre du fil" ; ceci en fonction de la taille des torons constituant le renfort de base. Les gradients de perméabilité constatés étant conséquents à des réarrangements d'ordre géométrique de la préforme, il n'est pas exclu qu'une optimisation de ces paramètres puisse aboutir à une réduction de l'intensité des gradients de perméabilité et éviter les fermetures de front d'avancée du fluide. L'optimisation de ces paramètres pourrait également intervenir dans la réduction de la taille des zones riches en résine localisées au voisinage des coutures lieu de la formation des fissures de la résine.



Dans les procédés de fabrication des composites par injection de résine (RTM ou Infusion), la présence de porosités dans la structure finale, même à très faibles taux, demeure un problème. Le constat fait, dans notre étude, pour les préformes cousues reste valable pour d'autres architectures de renfort. Il serait intéressant d'envisager l'étude de ce phénomène, afin d'identifier les mécanismes de génération des porosités, en phase d'imprégnation et en phase de réticulation de la résine. Dans cette optique, un sujet de stage master a été proposé au sein du laboratoire Roberval.

## Bibliographie

- [1] P. Tan, L. Tong, and G. P. Steven, "Modelling for predicting the mechanical properties of textile composites: A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 28, no. 11, pp. 903-922, 1997.
- [2] C. Ayranci and J. Carey, "2D braided composites: A review for stiffness critical applications," *Composite Structures*, vol. 85, no. 1, pp. 43-58, 2008.
- [3] G. Grail, "Approche multimodèle pour la conception de structures composites à renfort tissé," p. 6, 2013.
- [4] R. Zhou, H. Hu, N. Chen, and X. Feng, "An Improved MWK Structure for Composite Reinforcement," *Textile Research Journal*, vol. 75, no. 4, pp. 342-345, 2005.
- [5] P. Tan, L. Tong, and G. P. Steven, "Micromechanics models for mechanical and thermomechanical properties of 3D through-the-thickness angle interlock woven composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, no. 1999, pp. 637-648, 1999.
- [6] H. Gu and Z. Zhili, "Tensile behavior of 3D woven composites by using different fabric structures," *Materials & Design*, vol. 23, no. 7, pp. 671-674, 2002.
- [7] K. H. Tsai, C. H. Chiu, and T. H. Wu, "Fatigue behavior of 3D multi-layer angle interlock woven composite plates," *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 241-248, 2000.
- [8] S. Rudov-Clark and A. P. Mouritz, "Tensile fatigue properties of a 3D orthogonal woven composite," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, pp. 1018-1024, 2008.
- [9] A. P. Mouritz, "Review of z-pinned composite laminates," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 38, no. 12, pp. 2383-2397, 2007.
- [10] I. K. Partridge and D. D. R. Cartié, "Delamination resistant laminates by Z-Fiber® pinning: Part I manufacture and fracture performance," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, no. 1, pp. 55-64, 2005.
- [11] A. Ogale and P. Mitschang, "Tailoring of textile preforms for fibre-reinforced polymer composites," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 34, no. 2, pp. 77-96, 2004.
- [12] D. G. Bennett, "Introduction to ground-water hydraulics," *Techniques of Water-Resources States Geological Investigations Survey*, pp. 14-33, 1989.
- [13] A. Costa, "Permeability-porosity relationship: A reexamination of the Kozeny-Carman equation based on a fractal pore-space geometry assumption," *Geophysical Research Letters*, vol. 33, no. 2, pp. 1-5, 2006.

- [14] J. Kozey, *Über kapillare Leitung des Wassers im Boden*, vol. 136, pp. 271–306, 1927.
- [15] P. C. Carman, *Fluid flow through granular beds*, *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 75, pp. S32–S48, 1997.
- [16] B. R. Gebart, *Permeability of Unidirectional Reinforcements for RTM*, *Journal of Composite Materials*, vol. 26, no. 8, pp. 1100–1133, 1992.
- [17] N. C. Correia, F. Robitaille, A. C. Long, C. D. Rudd, P. Limsek, and S. G. Advani, *Use of Resin Transfer Molding Simulation to Predict Flow, Saturation, and Compaction in the VARTM Process*, *Journal of Fluids Engineering*, vol. 126, no. 2, p. 210, 2004.
- [18] C. Demaria, E. Ruiz, and F. Trochu, *In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven Fabrics by unidirectional injection part I: Experimental results*, *Polymers and Polymer Composites*, vol. 16, no. 2, pp. 101–113, 2008.
- [19] C. Demaria, E. Ruiz, and F. Trochu, *In-plane anisotropic permeability characterization of deformed woven fabrics by unidirectional injection. Part II: Prediction model and numerical simulations*, *Polymers and Polymer Composites*, vol. 16, no. 2, pp. 812–827, 2007.
- [20] N. Patel and L. J. Lee, *Modeling of void formation and removal in liquid composite molding. Part I: Wettability analysis*, *Polymer Composites*, vol. 17, no. 1, pp. 96–103, 1996.
- [21] D. H. Lee, W. Il Lee, and M. K. Kang, *Analysis and minimization of void formation during resin transfer molding process*, *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 16, pp. 3281–3289, 2006.
- [22] J. S. Leclerc and E. Ruiz, *Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding*, *Composites Part A*, vol. 39, no. 12, pp. 1859–1868, 2008.
- [23] N. Patel, V. Rohatgi, and L. J. Lee, *Micro scale flow behavior and void formation mechanism during impregnation through a unidirectional stitched fiberglass mat*, *Polymer Engineering and Science*, vol. 35, no. 10, pp. 837–851, 1995.
- [24] E. Ruiz, V. Achim, S. Soukane, F. Trochu, and J. Bréard, *Optimization of injection flow rate to minimize micro/macro-voids formation in resin transfer molded composites*, *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 3–4, pp. 475–486, 2006.
- [25] M. K. Kang, W. Il Lee, and H. T. Hahn, *Formation of microvoids during resin-transfer molding process*, *Composites Science and Technology*, vol. 60, no. 12–13, pp. 2427–2434, 2000.
- [26] J. R. Weitzenböck, R. A. Shenoi, and P. A. Wilson, *Radial flow permeability measurement. Part A: theory*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, no. 6, pp. 781–796, 1999.

- [27] J. R. Weitzenbock, R. A. Shenoi, and P. A. Wilson, Measurement of the principal permeability with the channel flow experiment, *Polymer Composites*, vol. 20, no. 2, pp. 321–334, 1999.
- [28] E. Heardman, C. Lekakou, and M. G. Bader, In-plane permeability of sheared fabrics, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 7, pp. 933–940, 2001.
- [29] M. A. Choi, M. H. Lee, J. Chang, and S. J. Lee, Permeability modeling of fibrous media in composite processing, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 79, no. 2, pp. 585–598, 1998.
- [30] C.-H. Shih and L. J. Lee, Effect of fiber architecture on permeability in liquid composite molding, *Polymer Composites*, vol. 19, no. 5, pp. 626–639, 1998.
- [31] P. Simacek and S. G. Advani, Permeability model for a woven fabric, *Polymer composites*, vol. 17, no. 6, pp. 887–899, 1996.
- [32] E. Ruiz and V. Achim, RTM process analysis and on-line characterization, *International Conference on Composite Materials*, pp. 1–10.
- [33] V. Michaud, M. Nordlund, T. S. Lundström, J. E. Månson, and V. Michaud, Capillary phenomena in Liquid Composite Moulding, *The 16th International Conference on Composite Materials (ICCM)*, pp. 1–9, 2007.
- [34] R. Gauvin, F. Trochu, Y. Lemenn, and L. Diallo, Permeability Measurement and Flow Simulation, *Polymer Composites*, vol. 17, no. 1, pp. 34–42, 1996.
- [35] J. Yang, Y. X. Jia, S. Sun, D. J. Ma, T. F. Shi, and L. J. An, Enhancements of the simulation method on the edge effect in resin transfer molding processes, *Materials Science and Engineering A*, vol. 478, pp. 384–389, 2008.
- [36] L. A. Isoldi, C. P. Oliveira, L. A. O. Rocha, J. A. Souza, and S. C. Amico, Three-dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 34, no. 2, pp. 105–111, 2012.
- [37] J. D. S. Porto, M. Letzow, S. C. Amico, J. A. Souza, and L. A. Isoldi, Computational Modeling of RTM and LRTM, vol. 11, no. 1, pp. 93–99, 2012.
- [38] Z. Cai and A. L. Berdichevsky, An improved self-consistent method for estimating the permeability of a fiber assembly, *Polymer Composites*, vol. 14, no. 4, pp. 314–323, 1993.
- [39] N. D. Ngo and K. K. Tamma, Microscale permeability predictions of porous fibrous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 44, no. 16, pp. 3135–3145, 2001.
- [40] K. L. Adams, B. Miller, and L. Rebenfeld, Forced in-plane flow of an epoxy resin in fibrous networks, *Polymer Engineering and Science*, vol. 26, no. 20, pp. 1434–1441, 1986.

- [41] B. Verleye, R. Croce, M. Griebel, M. Klitz, S. V. Lomov, G. Morren, H. Sol, I. Verpoest, and D. Roose, RPermeability of textile reinforcements: Simulation, influence of shear and validation,r *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 13, pp. 2804R2810, 2008.
- [42] B. Verleye, S. V. Lomov, A. Long, I. Verpoest, and D. Roose, RPermeability prediction for the meso-macro coupling in the simulation of the impregnation stage of Resin Transfer Moulding,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 1, pp. 29R35, 2010.
- [43] J. Van Der Westhuizen and J. P. Du Plessis, RAn attempt to quantify fibre bed permeability utilizing the phase average Navier-Stokes equation,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 4, pp. 263R269, 1996.
- [44] C. Y. Wang, RStokes flow through an array of rectangular fibers,r *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 22, no. 1, pp. 185R194, 1996.
- [45] Phelan, R. Frederick, and G. Wise, RAnalysis of transverse flow in aligned fibrous porous media,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 1, pp. 25R34, 1996.
- [46] A. Spaid, A. Michael, Phelan, and R. Frederick, RLattice Boltzmann methods for modeling microscale flow in fibrous porous media,r *Physics of Fluids*, vol. 9, no. 9, p. 2468, 1997.
- [47] T. D. Papathanasiou, RON the effective permeability of square arrays of permeable fiber tows,r *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 23, no. 1, pp. 81R92, 1997.
- [48] A. Nabovati, E. W. Llewellyn, and A. C. M. Sousa, RA general model for the permeability of fibrous porous media based on fluid flow simulations using the lattice Boltzmann method,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 6R7, pp. 860R869, 2009.
- [49] E. M. Sozer, S. Bickerton, and S. G. Advani, RON-line strategic control of liquid composite mould filling process,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 12, pp. 1383R1394, 2000.
- [50] C. Lai and W. Young, RModel resin permeation of fiber reinforcements after shear deformation,r *Polymer Composites*, vol. 18, no. 5, pp. 642R648, 1997.
- [51] D. E. Hirt, K. L. Adams, and R. K. P. Homme, RIn-plane radial fluid flow characterization of fibrous material,r *Journal of Building Physics*, vol. 10, no. 3, pp. 153R172, 1987.
- [52] C. Lekakou, M. A. K. Johari, D. Norman, and M. G. Bader, RMeasurement techniques and effects on in-plane permeability of woven cloths in resin transfer moulding,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, no. 5, pp. 401R408, 1996.
- [53] K. L. Adams and L. Rebenfeld, RPermeability characteristics of multilayer fiber reinforcements.Part II: Theoretical Model,r *Polymer Composites*, vol. 12, no. 3, pp. 179R185, 1991.

- [54] E. F. Gillio, S. G. Advani, J. W. Gillespie, and B. K. Fink, Investigation of the role of transverse flow in co-injection resin transfer molding, *Polymer composites*, vol. 19, no. 6, pp. 738-746, 1998.
- [55] J. Sheard, V. Senft, S. C. Mantell, and J. H. Vogel, Determination of corner and edge permeability in resin transfer molding, *Polymer Composites*, vol. 19, no. 1, pp. 96-105, 1998.
- [56] S. Amico and C. Lekakou, An experimental study of the permeability and capillary pressure in resin-transfer moulding, *Composites Science and Technology*, vol. 61, no. 13, pp. 1945-1959, 2001.
- [57] Y. Luo, I. Verpoest, K. Hoes, V. Marleen, S. Hugo, and A. Cardon, Permeability measurement of textile reinforcements with several test fluids, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 32, no. 10, pp. 1497-1504, 2001.
- [58] D. A. Steenkamer, S. H. McKnight, D. J. Wilkins, and V. M. Karbhari, Experimental characterization of permeability and fibre wetting for liquid moulding, *Journal of Materials Science*, vol. 30, no. 12, pp. 3207-3215, 1995.
- [59] Y. Ma and S. Roshan, Permeability characterization of different architectural fabrics, *Journal of Composite Materials*, vol. 33, no. 8, pp. 729-750, 1999.
- [60] C. Binétruy and J. Pabiot, Effects of fabric architectural heterogeneities on effective and saturated permeabilities in RTM., *Proceedings of ICCM12, Paris*, pp. 5-7, 1999.
- [61] D. D. R. Cartié, M. Troulis, and I. K. Partridge, Delamination of Z-pinned carbon fibre reinforced laminates, *Composites Science and Technology*, vol. 66, no. 6, pp. 855-861, 2006.
- [62] C. A. Steeves and N. A. Fleck, In-plane properties of composite laminates with through-thickness pin reinforcement, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 43, no. 10, pp. 3197-3212, 2006.
- [63] T. S. Lundström, Permeability of non-crimp stitched fabrics, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 12, pp. 1345-1353, 2000.
- [64] H. Jinlian, L. Yi, and S. Xueming, Effect of Stitches on the Permeability of Interbundle Channels in Stitched Fabrics, *Textile Research Journal*, vol. 73, no. 8, pp. 691-699, 2003.
- [65] M. Nordlund and T. Staffan Lundstrom, Numerical Study of the Local Permeability of Noncrimp Fabrics, *Journal of Composite Materials*, vol. 39, no. 10, pp. 929-947, 2005.
- [66] C. Lekakou, S. Edwards, G. Bell, and S. C. Amico, Computer modelling for the prediction of the in-plane permeability of non-crimp stitch bonded fabrics, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 6, pp. 820-825, 2006.

- [67] M. Nordlund, T. S. Lundström, V. Frishfelds, and A. Jakovics, RPermeability network model for non-crimp fabrics,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 37, no. 6, pp. 826R835, 2006.
- [68] S. Drapier, A. Pagot, A. Vautrin, and P. Henrat, RInfluence of the stitching density on the transverse permeability of non-crimped new concept (NC2) multiaxial reinforcements: Measurements and predictions,r *Composites Science and Technology*, vol. 62, no. 15, pp. 1979R1991, 2002.
- [69] C.H.CHU and C.C.CHENG, RPermeability of Stitched MMWK Laminates in Resin Transfer Molding,r *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 21, no. 5, pp. 391R408, 2002.
- [70] G. Rieber and P. Mitschang, R2D permeability changes due to stitching seams,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 1, pp. 2R7, 2010.
- [71] H. Talvensaari, E. Ladstätter, and W. Billinger, RPermeability of stitched preform packages,r *Composite Structures*, vol. 71, no. 3R4, pp. 371R377, 2005.
- [72] J. Davis, G. Bohon, and H. L, RFirst NASA Advanced Composites Technology Conference,r *NASA Conference Publication*, 1991.
- [73] R. C. Holzwarth, RAn overview of the Advanced Lightweight Aircraft Fuselage Structures ( ALAFS ) Program,r *In Proceedings of the AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference and exhibit*, pp. 2252R2262, 1996.
- [74] F. Aymerich, P. Priolo, and C. T. Sun, RStatic and fatigue behaviour of stitched graphite/epoxy composite laminates,r *Composites Science and Technology*, vol. 63, no. 6, pp. 907R917, 2003.
- [75] M. Colin de Verdiere, A. K. Pickett, A. A. Skordos, and V. Witzel, REvaluation of the mechanical and damage behaviour of tufted non crimped fabric composites using full field measurements,r *Composites Science and Technology*, vol. 69, no. 2, pp. 131R138, 2009.
- [76] K. A. Dransfield, L. K. Jain, and Y. W. Mai, ROn the effects of stitching in CFRPs I. mode I delamination toughness,r *Composites Science and Technology*, vol. 58, no. 6, pp. 815R827, 1998.
- [77] W. C. Chung, B. Z. Jang, L. R. Hwang, R. C. Wilcox, and T. C. Chang, RFracture behavior in stitched multidirectionai composites,r *Materials Science and Engineering*, vol. 112, pp. 157R173, 1989.
- [78] H. Heß and N. Himmel, RStructurally stitched NCF CFRP laminates. Part 1: Experimental characterization of in-plane and out-of-plane properties,r *Composites Science and Technology*, vol. 71, no. 5, pp. 549R568, 2011.
- [79] U. Beier, J. K. W. Sandler, A. Volker, H. Spanner, and C. Weimer, RMechanical performance of carbon fibre-reinforced composites based on stitched and bindered

- preforms, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 11, pp. 1756–1763, 2009.
- [80] A. Yudhanto, N. Watanabe, Y. Iwahori, and H. Hoshi, *Compression properties and damage mechanisms of stitched carbon/epoxy composites*, *Composites Science and Technology*, vol. 86, pp. 52–60, 2013.
  - [81] E. WU and J. WANG, *Behaviour of stitched laminates under in-plane tensile and transverse impact loading*, *Journal of Composite Materials*, vol. 29, no. 17, pp. 2254–2279, 1995.
  - [82] G. L. Farley, B. T. Smith, and J. Maiden, *Compression response of thick layer composite laminates with through-the-thickness reinforcement*, *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 11, no. 7, pp. 787–810, 1992.
  - [83] L. K. Jain and Y.-W. Mai, *Recent work on stitching of laminated composites – theoretical analysis and experiments*, *Eleventh International Conference on Composite Materials*, vol. I, pp. 25–51, 1997.
  - [84] J. R. Reeder, *Stitching vs. a toughened matrix: compression strength effects*, *Journal of Composite Materials*, vol. 29, no. 18, pp. 2464–2487, 1995.
  - [85] V. Koissin, J. Kustermans, S. V. Lomov, I. Verpoest, B. Van Den Broucke, and V. Witzel, *Structurally stitched NCF preforms: Quasi-static response*, *Composites Science and Technology*, vol. 69, no. 15, pp. 2701–2710, 2009.
  - [86] A. P. Mouritz and B. N. Cox, *A mechanistic approach to the properties of stitched laminates*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, no. 1, pp. 1–27, 2000.
  - [87] A. P. Mouritz, K. H. Leong, and I. Herszberg, *A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 28, no. 12, pp. 979–991, 1997.
  - [88] S. Das, P. Choudhury, S. Halder, and P. Sriram, *Stress and free edge delamination analyses of delaminated composite structure using ANSYS*, *Procedia Engineering*, vol. 64, pp. 1364–1373, 2013.
  - [89] K. Dransfield, C. Baillie, and Y.-W. Mai, *Improving the delamination resistance of CFRP by stitching – A review*, *Composites Science and Technology*, vol. 50, no. 3, pp. 305–317, 1994.
  - [90] T. J. KANG and S. H. Lee, *Effect of stitching on the mechanical and impact properties of woven laminate composite*, *Journal of Composite Materials*, vol. 28, no. 16, pp. 1574–1587, 1994.



- [91] F. Pang, C. H. Wang, and R. G. Bathgate, RCreep response of woven-fibre composites and the effect of stitching,r *Composites Science and Technology*, vol. 57, no. 1, pp. 91R98, 1997.
- [92] A. P. Mouritz, J. Gallagher, and A. A. Goodwin, RFlexural strength and interlaminar shear strength of stitched GRP laminates following repeated impacts,r *Composites Science and Technology*, vol. 57, no. 5, pp. 509R522, 1997.
- [93] U. Beier, F. Wolff-Fabris, F. Fischer, J. K. W. Sandler, V. Altstädt, G. Hülder, E. Schmachtenberg, H. Spanner, C. Weimer, T. Roser, and W. Buchs, RMechanical performance of carbon fibre-reinforced composites based on preforms stitched with innovative low-melting temperature and matrix soluble thermoplastic yarns,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, no. 9, pp. 1572R1581, 2008.
- [94] A. Hammami, R. Gauvin, F. Trochu, O. Touret, and P. Ferland, RAnalysis of the edge effect on flow patterns in liquid composites molding,r *Applied Composite Materials*, vol. 5, no. 3, pp. 161R173, 1998.
- [95] J. Li, C. Zhang, R. Liang, and B. Wang, RStatistical characterization and robust design of RTM processes,r *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 36, no. 5, pp. 564R580, 2005.
- [96] J. Gajdošík, J. Zeman, and M. ejnoha, RQualitative analysis of fiber composite microstructure: Influence of boundary conditions,r *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 21, no. 4, pp. 317R329, 2006.
- [97] R. Blanc, RApport des statistiques spatiales à l'élaboration de critères d'homogénéité et à l'inférence en analyse de texture. Application à la caractérisation des. matériaux,r *Thèse, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I*, 2007.
- [98] M. T. Cann, D. O. Adams, and C. L. Schneider, RCharacterization of fiber volume fraction gradients in composite laminates,r *Journal of Composite Materials*, vol. 42, no. 5, pp. 447R466, 2008.
- [99] C. Santulli, R. G. Gil, A. C. Long, and M. J. Clifford, RVoid content measurements in commingled E-Glass/ polypropylene composites using image analysis from optical micrographs,r *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 10, no. 2, pp. 77R90, 2002.
- [100] A. H. Kite, D. K. Hsu, and D. J. Barnard, RDetermination of porosity content in composites by micrograph image processing,r *REVIEW OF PROGRESS IN QUANTITATIVE NONDESTRUCTIVE EVALUATION: 34th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. AIP Publishing*, vol. 975, no. 1, pp. 942R949, 2008.
- [101] Y. Ledru, REtude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques,r *Thèse, Université de Toulouse*, 2009.

- [102] S. Paciornik and J. R. M. D’Almeida, Measurement of void content and distribution in composite materials through digital microscopy, *Journal of Composite Materials*, vol. 43, no. 2, pp. 101–112, 2009.
- [103] M. Sablier, Analyse d’images, *Techniques de l’ingénieur*, vol. P855, pp. 1–15, 1998.
- [104] R. D. Sweeting and R. D. Thomson, The effect of thermal mismatch on Z-pinned laminated composite structures, *Composite Structures*, vol. 66, no. 1–4, pp. 189–195, 2004.
- [105] L. W. Byrd and V. Birman, Effect of temperature on stresses and delamination failure of z-pinned joints, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 48, no. 9, pp. 938–949, 2006.
- [106] K. K. Han, C. W. Lee, and B. P. Rice, Measurements of the permeability of fiber preforms and applications, *Composites Science and Technology*, vol. 60, no. 12–13, pp. 2435–2441, 2000.
- [107] Y.-H. Lai, B. Khomami, and J. L. Kardos, Accurate permeability characterization of preforms used in polymer matrix composite fabrication processes, *Polymer Composites*, vol. 18, no. 3, pp. 368–377, 1997.
- [108] J. Slade, K. M. Pillai, and S. G. Advani, Investigation of unsaturated flow in woven, braided and stitched fiber mats during mold-filling in resin transfer molding, *Polymer Composites*, vol. 22, no. 4, pp. 491–505, 2001.
- [109] L. Diallo, R. Gauvin, and F. Trochu, Key factors affecting the permeability measurement in continuous fiber reinforcements, in *Proceedings of ICCM-11*, 1997, pp. 441–449.
- [110] G. Francucci, E. S. Rodríguez, and A. Vázquez, Study of saturated and unsaturated permeability in natural fiber fabrics, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 1, pp. 16–21, 2010.
- [111] R. Arbter, J. M. Beraud, C. Binetruy, L. Bizet, J. Bréard, S. Comas-Cardona, C. Demaria, A. Endruweit, P. Ermanni, F. Gommer, S. Hasanovic, P. Henrat, F. Klunker, B. Laine, S. Lavanchy, S. V. Lomov, A. Long, V. Michaud, G. Morren, E. Ruiz, H. Sol, F. Trochu, B. Verleye, M. Wietgreffe, W. Wu, and G. Ziegmann, Experimental determination of the permeability of textiles: A benchmark exercise, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 9, pp. 1157–1168, 2011.
- [112] N. Vernet, E. Ruiz, S. Advani, J. B. Alms, M. Aubert, M. Barburski, B. Barari, J. M. Beraud, D. C. Berg, N. Correia, M. Danzi, T. Delavière, M. Dickert, C. Di Fratta, A. Endruweit, P. Ermanni, G. Francucci, J. a. Garcia, A. George, C. Hahn, F. Klunker, S. V. Lomov, A. Long, B. Louis, J. Maldonado, R. Meier, V. Michaud, H. Perrin, K. Pillai, E. Rodriguez, F. Trochu, S. Verheyden, M. Weitgreffe, W. Xiong, S. Zaremba, and G. Ziegmann, Experimental determination of the permeability of engineering textiles: Benchmark II, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 61, pp. 172–184, 2014.

- [113] P. Ferland and F. Trochu, *Concurrent methods for permeability measurement in Resin Transfer Molding*, vol. 17, no. 1, 1996.
- [114] X. Zhang, *Contribution à l'étude de l'apport des coutures sur les performances mécaniques des structures composites cousues*, *Thèse, Université de Technologie de Compiègne*, pp. 49-73, 2013.
- [115] K. T. Kedward, *On the short beam test method*, *Fibre Science And Technology*, vol. 5, no. 2, pp. 85-95, 1971.
- [116] C. A. Berg, J. Tirosh, and M. Israeli, *Analysis of short beam bending of fiber reinforced composites*, *Astm Std*, vol. 497, pp. 206-218, 1972.